



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR E ASPECTOS TEXTURAIS DE
SEDIMENTOS DO RIO PARANÁ E SUAS IMPLICAÇÕES PARA OS
AGREGADOS DE CONSTRUÇÃO**

MARIA CECÍLIA SILVA ARAÚJO

MONOGRAFIA nº 435

Ouro Preto, junho de 2022

**PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR E ASPECTOS TEXTURAIS
DE SEDIMENTOS DO RIO PARANÁ E SUAS IMPLICAÇÕES
PARA OS AGREGADOS DE CONSTRUÇÃO**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Junior

Vice-Diretor

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Ms. Edison Tavaza

MONOGRAFIA

Nº 435

PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR E ASPECTOS TEXTURAIS DE SEDIMENTOS DO RIO PARANÁ E SUAS IMPLICAÇÕES PARA OS AGREGADOS DE CONSTRUÇÃO

Orientadora

Prof. Dr. Isaac Daniel Rudnitzki

Co-Orientadores

Prof. Dr. Carlos Conforti Ferreira Guedes

Marcela Chinen Machado

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 401, ano letivo 2021/2.

OURO PRETO

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A663p Araujo, Maria Cecilia Silva.

Proveniência sedimentar e aspectos texturais de sedimentos do rio Paraná e suas implicações para os agregados de construção.

[manuscrito] / Maria Cecilia Silva Araujo. - 2022.

51 f.

Orientador: Prof. Dr. Isaac Daniel Rudnitzki.

Coorientadores: Prof. Dr. Carlos Conforti Ferreira Guedes, Marcela Chinen Machado.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Sedimentologia. 2. Minerais pesados. 3. Paraná, Rio, Bacia. 4. Agregados (Materiais de construção). I. Guedes, Carlos Conforti Ferreira. II. Machado, Marcela Chinen. III. Rudnitzki, Isaac Daniel. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 551.3.051

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Maria Cecília Silva Araújo

Proveniência sedimentar e aspectos texturais de sedimentos do rio Paraná e suas implicações para os agregados de construção

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Geológica

Aprovada em 22 de junho de 2022

Membros da banca

Prof. Dr. Isaac D. Rudnitzki _____ Departamento de Geologia/ Universidade Federal de Ouro Preto
(orientador)

Profa. Dra. Alice F. de Oliveira Costa _____ Departamento de Geologia/ Universidade Federal de Ouro Preto

MSc. Pamela de Oliveira Tito _____ Departamento de Geologia/ Universidade Federal de Ouro Preto

Isaac D. Rudnitzki, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Isaac Daniel Rudnitzki, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2022, às 14:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0352252** e o código CRC **30E78DE3**.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por todas as bênçãos.

Aos meus pais Márcia e Lincoln por serem minha base, pelos esforços constantes para que eu pudesse ter a melhor formação e por acreditarem sempre em mim.

À minha irmã Maria Eduarda, minha amiga e companheira de vida.

À República Rosa Xiclete e às grandes mulheres que a compõe.

À Thalita e Carol pela amizade e companheirismo diário.

À todas as amizades construídas até hoje.

À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e ao Departamento de Geologia (DEGEO) pelo ensino público de qualidade e pela possibilidade de viver anos extraordinários.

Aos professores Maria Eugênia, Alice, Issamu, Maria Silva, Cláudio Lana, Tazava, Raquel, Danderfer e Humberto por serem inspiração.

À geogalera 16.1 e 16.2.

Ao PET e à Adivane pelo conhecimento compartilhado.

Ao Isaac pela orientação e apoio durante toda a graduação.

Ao professor Carlos Guedes pela disponibilidade e orientação.

Ao técnico Daniel e à Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo apoio.

À Marcela pela confiança e orientação.

À Mineral Geologia pela oportunidade e pelos dados fornecidos.

Por fim, a todos pela paciência!

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	viii
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
RESUMO	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 JUSTIFICATIVA	3
2 MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.2 LEVANTAMENTO DO BANCO DE DADOS E ANÁLISE QUALITATIVA.....	5
2.3 TRABALHO DE CAMPO.....	6
2.4 ANÁLISE DE MINERAIS PESADOS.....	7
3 GEOLOGIA REGIONAL.....	11
3.1 BACIA DO PARANÁ	12
3.1.1 EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR	12
3.2 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO.....	16
3.3 MINERAIS PESADOS ASSOCIADOS AO RIO PARANÁ.....	17
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
4.1 ASPECTOS DOS SEDIMENTOS.....	21
4.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	21
4.1.2 MORFOLOGIA DOS SEDIMENTOS	23
4.2 MINERAIS PESADOS	24
4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MINERAIS PESADOS.....	24
4.2.2 ESTABILIDADE DOS MINERAIS PESADOS	25
4.2.3 PARÂMETROS DE PROVENIÊNCIA	25
4.3 AREIA COMO AGREGADO PARA CONSTRUÇÃO CIVIL	26
5 RESULTADOS.....	28
5.1 CARACTERÍSTICAS DAS FEIÇÕES TEXTURAL	28
5.2 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS MIÚDOS	32
5.3 CARACTERÍSTICAS DOS MINERAIS PESADOS.....	35
6 DISCUSSÃO	39
6.1 FEIÇÕES TEXTURAIS VERSUS QUALIDADE DE AGREGADO MIÚDO.....	39

6.2 ASPECTOS TEXTURAIS <i>VERSUS</i> AMBIENTE DEPOSICIONAL	41
6.3 SIGNIFICADO DAS ASSEMBLEIAS DE MINERAIS PESADOS IDENTIFICADAS	44
7 CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização da área de estudo com os pontos de amostragem.	2
Figura 2.1: Fluxograma dos métodos utilizados neste trabalho de conclusão de curso	5
Figura 2.2: Fluxograma das etapas de preparação das amostras	7
Figura 2.3: Estrutura para separação de minerais pesados por sedimentação gravitacional	8
Figura 2.4: Esquema da confecção de lâminas petrográficas de minerais pesados.....	9
Figura 3.1: Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná	11
Figura 3.2: Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná	15
Figura 3.3: Mapa geológico da área de ocorrência do Alogrupo Alto Rio Paraná.....	16
Figura 4.1: Classificação dos Sedimentos segundo o grau de arredondamento e esfericidade.....	23
Figura 5.1: Granulometria predominante nas áreas de estudo	29
Figura 5.2: Grau de Arredondamento.....	29
Figura 5.3: Grau de esfericidade	29
Figura 5.4: Classificação do desvio padrão, assimetria e curtose.	31
Figura 5.5: Classificação do desvio padrão, assimetria e curtose.	32
Figura 5.6: Classificação do Módulo de Finura.	33
Figura 5.7: Classificação Granulométrica das áreas com os limites inferiores e superiores.....	34
Figura 5.8: Porcentagem de minerais pesados na Área 2.....	35
Figura 5.9: Minerais identificados na Área 2 de estudo.....	37
Figura 6.1: Feições (A) granulométricas e (B) texturais dos sedimentos da Área 1.	42
Figura 6.2: Feições (A) granulométricas e (B) texturais dos sedimentos da Área 2	43
Figura 6.3: Feições (A) granulométricas e (B) texturais dos sedimentos da Área 3	43
Figura 6.4: Gráfico do desvio padrão pelo diâmetro médio, dados em <i>phi</i>	44

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Série de sequência normal de peneiras e sua classificação granulométrica	6
Tabela 3.3: Minerais pesados da supersequencia Bauru	19
Tabela 4.1: Minerais pesados derivados de certos tipos de rochas	24
Tabela 4.2: Ordem de estabilidade dos minerais pesados	25
Tabela 4.3: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo	26
Tabela 5.1: Quantificação das amostras de acordo com os métodos	30
Tabela 5.2: Classificação quanto a Massa Específica	33
Tabela 5.3: Quantificação de minerais pesados encontrados	35

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1: Minerais pesados ocorrentes na bacia hidrográfica do rio Paraná	18
Quadro 4.1: Parâmetros Granulométricos Estatísticos, para os métodos de momentos.....	22

Resumo

O Rio Paraná, ao longo da divisa dos estados do Paraná e Mato Grosso do Sul, situa-se na porção oeste da Bacia Sedimentar do Paraná. A área é composta por aluviões atuais quaternários e, em suas imediações, observa-se aluviões em terraços, do Neógeno e Quaternário, arenitos do Grupo Caiuá, do Cretáceo Médio, e rochas basálticas da Província Magmática do Paraná (Formação Serra Geral), do Cretáceo Inferior. Os aluviões estudados são compostos majoritariamente por areia, distribuídos como depósitos de canal e depósitos de barras transversais, longitudinais e laterais. O presente trabalho realizou um estudo de caracterização sedimentológica e de minerais pesados em depósitos de aluvião ao longo Rio Paraná, com o objetivo de determinar possíveis variações nos aspectos texturais e proveniências sedimentar. Foram analisadas amostras de sedimentos de três áreas denominadas: Áreas 1, 2 e 3. De modo geral apresentaram-se como subarredado a arredondado e com esfericidade alta. Quanto às análises granulométricas predominaram as seguintes classificações, segundo a classificação nominal de Folk & Ward (1957): moderadamente selecionadas, aproximadamente simétrico a assimetria negativa e mesocúrtica a leptocúrtica, e pelos métodos dos momentos: moderadamente selecionadas, assimetria muito negativa e extremamente leptocúrtica. O diâmetro médio varia de 0,18 a 5,02 mm. A massa específica real foi apontada como pesada, e o módulo de finura e a curva granulométrica prevaleceram dentro da zona inferior utilizável. A quantificação dos minerais pesados mostrou que 79% dos minerais são opacos, e entre os translúcidos os mais recorrentes foram estaurolita, cianita, granada, turmalina, epidoto e zircão. Os resultados mostraram que a areia do rio Paraná apresenta as características de um agregado miúdo, que as feições texturais e granulométricas variam entre as três áreas e a assembleia de minerais pesados indica que esses sedimentos provêm do grupo Bauru e da Província Magmática do Paraná.

Palavras-chave: sedimentologia, análise textural, proveniência sedimentar, minerais pesados, agregado miúdo, Bacia do Paraná.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A análise de proveniência dos depósitos aluviais permite identificar a composição mineralógica e litológica das áreas-fonte, inferir sua localização geográfica, clima e relevo, determinar as principais rotas de distribuição das areias, e estimar a distância e tempo de transporte (Caracciolo 2020). A mineralogia dos sedimentos clásticos reflete os aspectos da rocha fonte, enquanto os parâmetros texturais relacionam-se com o modo de transporte e as condições energéticas do meio de transporte. Desse modo, a combinação de análises de minerais pesados com as análises texturais e granulométricas dos sedimentos permitem a contextualização histórica do sedimento, desde a área-fonte até o local de deposição (Friedman 1961 e Remus *et al.* 2008).

Arelado a isso, conhecer a história do sedimento permite compreender as características e individualidades da areia como agregado para construção civil oriundas de diferentes fontes. Os parâmetros texturais, muitas vezes associados à área-fonte, condicionam a qualidade do produto no mercado, uma vez que determina fatores importantes de qualidade: a quantidade de água e sua resistência (Kiambigi, *et al.* 2018).

Depósitos cenozoicos de origem aluvial podem ser encontrados ao longo da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Paraná, na divisa dos estados do Paraná e Mato Grosso do Sul. Estes depósitos ocorrem sobre as rochas cretáceas do Grupo Bauru, Grupo Caiuá e da Província Magmática do Paraná (Formação Serra Geral) e, em alguns locais, sobre a sequência Permiana da Bacia do Paraná (Stevaux 1993, Besser *et al.* 2021). Por décadas, estes depósitos têm sido utilizados como fontes de minério para agregados para construção civil (cascalho, areia e argila), para diversas regiões. Apesar da sua ampla utilização, a qualidade deste material em termos de aspecto textural, bem como a variação em função da sua área-fonte ainda não foram definidos com clareza. Estudos como de Stevaux (1993), Gasparetto & Santos (2005) e Sallun *et al.* (2007) caracterizam o grão quanto aos seus parâmetros texturais e cronológicos, entretanto não fazem uma interface os aspectos que regem os depósitos como minérios para a construção civil.

Este trabalho de conclusão de curso teve como finalidade apresentar uma análise de ensaios granulométricos e texturais dos sedimentos que compõem o leito do Rio Paraná, ao longo da divisa dos estados do Paraná e Mato Grosso do Sul, bem como uma análise dos minerais pesados a procura da sua proveniência mineral e dos impactos na qualidade de agregados, principalmente areia, para o uso na construção civil.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo encontra-se na região oeste do estado do Paraná e sudeste do Mato Grosso do Sul (Figura 1.1), ao longo da divisa dos estados. Os pontos analisados concentram-se em três áreas: a primeira, mais ao norte, próximo à divisa com o estado de São Paulo (Área 1), a segunda próximo à cidade de Icaraíma (Área 2) e a última, mais ao sul, próximo à divisa com o Paraguai (Área 3).

O campo para caracterização textural e mineralógica foi na Área 2. A região posiciona-se cerca de 650 quilômetros de Curitiba e o acesso à área, na cidade de Icaraíma, distrito de Porto Figueira, é realizado a partir das rodovias federais BR-277, BR-467 e BR-163. O acesso ao rio é feito por barcos e balsas, dispostos nos portos ao longo da divisa dos estados. Além disso, várias estradas vicinais que interligam as localidades, distritos, vilas e fazendas da região, completam o sistema viário da região.

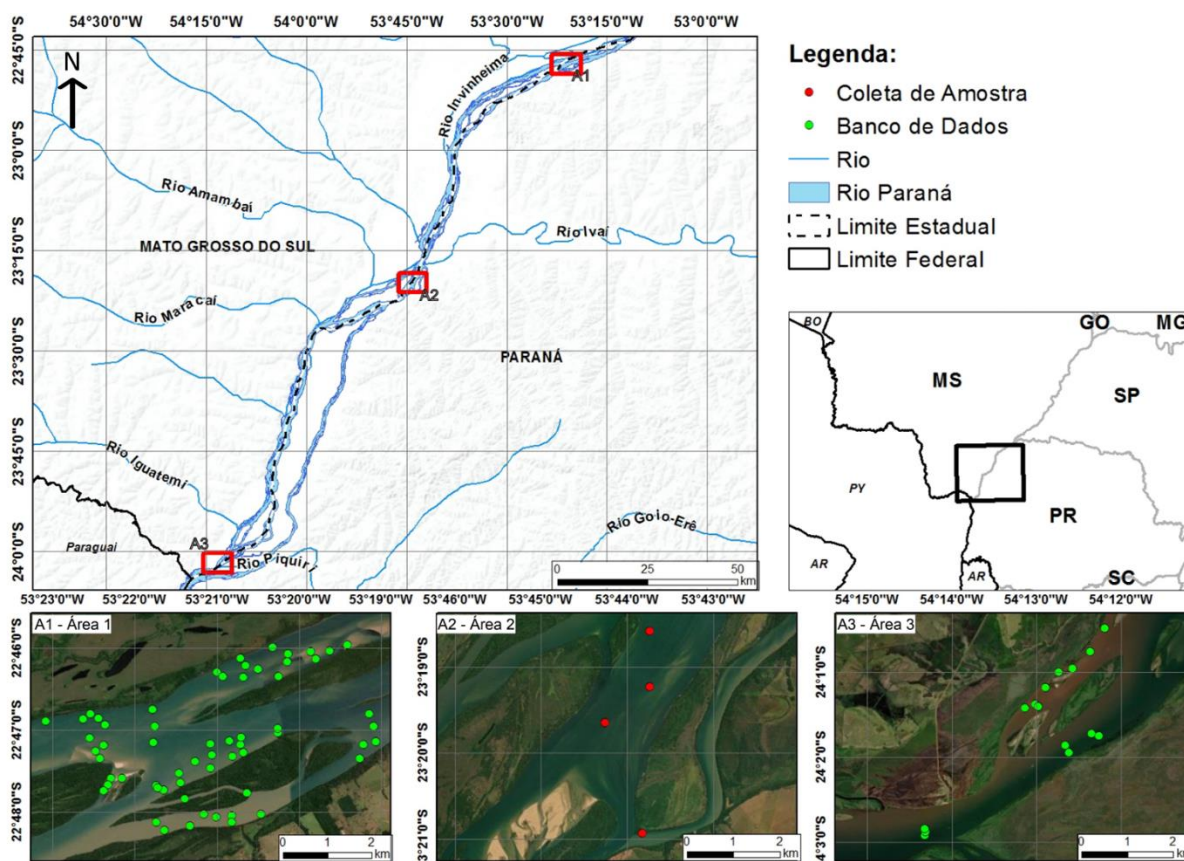


Figura 1.1: Localização da área de estudo com os pontos de amostragem feitos neste trabalho e os pontos de amostragem adquiridos no banco de dados da empresa Mineral Geologia. Fonte: Modificado de IBGE (2015) e ANA (2010).

1.3 OBJETIVOS

O objetivo primordial desse trabalho é caracterizar os sedimentos aluvionares do Rio Paraná nas áreas de estudo, localizadas ao longo da divisa dos estados do Paraná e Mato Grosso do Sul, a fim de definir seus aspectos texturais e as áreas fontes e verificar se estes fatores influenciam na qualidade dos agregados para construção civil.

Os objetivos específicos incluem:

- Verificar qual significado deposicional em relação a natureza do depósito a partir da avaliação quantitativa dos aspectos texturais;
- Comparar as classificações granulométricas;
- Verificar se há ou não relação entre as possíveis áreas-fonte dos depósitos aluvionares com os aspectos texturais dos sedimentos bem como na qualidade do material com utilização para agregados para construção civil.

1.4 JUSTIFICATIVA

O Rio Paraná é a segunda maior bacia hidrográfica da América do Sul e está entre os dez maiores do mundo (Stevaux 1993). Devido ao seu potencial hidrelétrico existem grandes reservatórios para a geração de energia hidrelétrica. Entretanto, ao longo da divisa dos estados do Paraná e Mato Grosso do Sul encontra-se uma extensa área não represada do rio. Este fator é o que favorece e permite o requerimento por processos minerários, sendo a areia a principal substância (Agência Nacional de Mineração, ANM 2021). Sabe-se que esta areia apresenta alta qualidade como agregado para construção civil e que atualmente é responsável por abastecer grande parte do oeste do estado do Paraná.

Stevaux (1993) fala sobre a pobreza de informações na área e dos imensuráveis problemas ambientais associados ao rápido e desgovernado desenvolvimento da região. Esse desenvolvimento está associado com o aumento de títulos minerários de agregados para construção civil, que desde a década de 60 está em constante expansão (Santos 2013).

Nas últimas décadas, com o aumento de títulos minerários e consequente desenvolvimento econômico ocorreu um significativo incremento de pesquisas na região, nas diversas áreas de ensino. Stevaux (1993) destaca as pesquisas realizadas pela Universidade Estadual de Maringá (UEM), com ênfase nas áreas de limnologia e aquicultura e em estudos multidisciplinares do ambiente. Atualmente, a pós-graduação em geografia da UEM desenvolve pesquisas relacionadas a Geomorfologia: estrutural, do quaternário e fluvial; estrutura e dinâmica de paisagens no rio Paraná e nos grupos Caiuá e Bauru (UEM 2022). Entretanto, ainda são escassos os estudos voltados a sedimentologia destes depósitos sedimentares cenozoicos que compõem o curso hídrico.

Dessa forma, o presente trabalho é justificado pela escassez de pesquisas direcionadas às análises sedimentológicas dos depósitos sedimentares que ocorrem ao longo do Rio Paraná e pela necessidade de reconhecer os fatores geológicos que influenciam no tipo e qualidades dos materiais de agregados utilizados na construção civil.

CAPÍTULO 2

MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento desse trabalho incluiu as etapas de revisão bibliográfica, levantamento do banco de dados e análise qualitativa dos mesmos, coleta de sedimentos em novos pontos que foram submetidos a análise textural qualitativa e análise dos minerais pesados (Figura 2.1).

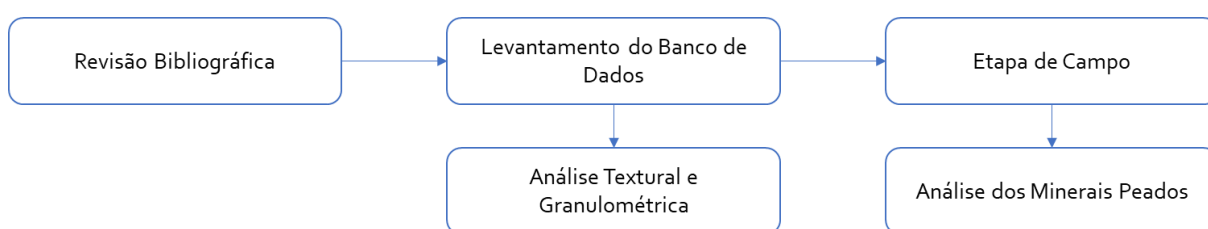


Figura 2.1: Fluxograma dos métodos utilizados neste trabalho de conclusão de curso

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As principais bases de consulta bibliográfica foram os artigos *Bacia do Paraná* (Milani *et al.* 2007) e *Evolution and palaeoenvironment of the Bauru Basin (Upper Cretaceous, Brazil)* (Fernandes & Magalhães Ribeiro 2015), por possuírem estudos mais abrangentes sobre os aspectos geológicos da região, contextualizando amplamente a área. Visando ainda o entendimento dos métodos a serem aplicados durante a realização da pesquisa, realizou-se a leitura de textos e artigos com temas relacionados à proveniência mineral e aspectos texturais dos grãos, destacando os estudos de Suguio (1973) e Morton & Hallswort (1994). Adicionalmente, materiais referentes ao uso e aplicação da areia como agregado para construção civil também serão constantemente utilizados nesse estudo.

2.2 LEVANTAMENTO DO BANCO DE DADOS E ANÁLISE QUALITATIVA

Realizou-se a avaliação do banco de dados da empresa Mineral Geologia no período 2016-2021 para análises sedimentológicas quantitativas: média, desvio padrão, moda, curtose, diâmetro médio, arredondamento e esfericidade, visando a geração de gráficos analíticos. Estes gráficos foram produzidos a partir do *software Excel 2019*. As informações a respeito do grau de arredondamento, esfericidade, módulo de finura, dimensões máximas, densidade aparente e densidade real foram obtidas diretamente do banco de dados e, com base nos ensaios granulométricos, os dados foram tratados pelo programa *Gradistat*, versão 9.1 (Blott & Pye 2001).

Os dados de entrada para o programa *Gradistat* foram os valores obtidos através do peneiramento das amostras, sendo a quantidade de material retido em cada intervalo de peneira. Esse processo se deu segundo a sequência normal de peneiras (Tabela 2.1), regulado pela NBR NM ISO 3310-1 (ABNT 2010). Os dados de saída utilizados foram as classificações segundo os trabalhos de Folk & Ward (1957) e Folk (1980), e a NBR 7.211 (ABNT 2005).

Tabela 2.1: Série de sequência normal de peneiras e sua classificação granulométrica (ANBT 2005 e ABNT 2010)

Abertura da Peneira (mm)	Classificação Granulométrica
75	Pedregulho
37,5	
19	
4,75	Areia Grossa
2,36	
1,18	Areia média
0,6	
0,3	
0,15	Areia fina
0,075	

Os gráficos gerados a partir das informações de saída do programa *Gradistat* (Anexo 1) buscaram qualificar e classificar as amostras.

2.3 TRABALHO DE CAMPO

Foi realizado o campo no Rio Paraná, nas proximidades da cidade de Icaraíma, no dia 9 dezembro de 2021, com a coleta de sedimentos. Os pontos de coleta ocorrem na Área 2 (Figura 1.1), devido à disponibilidade da empresa. A coleta dos sedimentos foi realizada com o auxílio de um amostrador cônico, no qual retira-se de cada ponto a quantidade aproximada de 1 quilograma de amostra. O material coletado foi devidamente acondicionado em sacos plásticos e etiquetado, levado para o laboratório da empresa.

No laboratório da empresa Mineral Geologia, as amostras foram homogeneizadas, quarteadas e secas na estufa por 12 horas, a 110 graus Celsius. Para o peneiramento utilizou-se entre 100 e 200 gramas de material e, com o restante, foi realizada a classificação geológica e separado para análise dos minerais pesados (Figura 2.2).

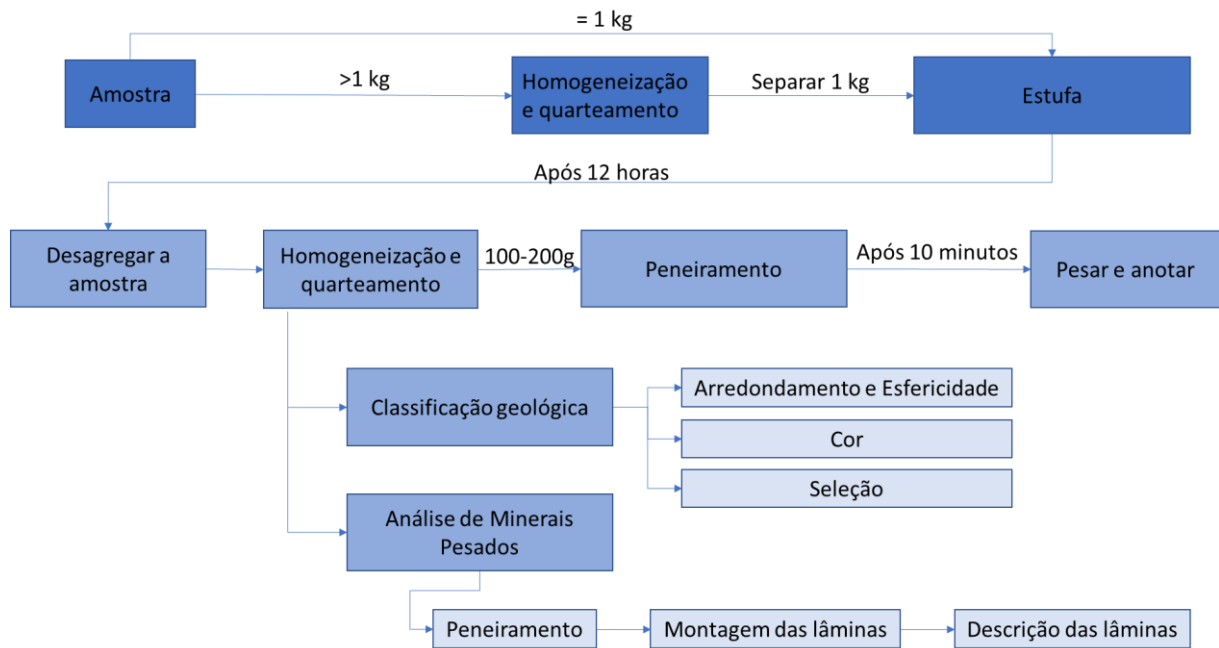


Figura 2.2: Fluxograma das etapas de preparação das amostras para análises granulométrica e separação de minerais pesados

2.4 ANÁLISE DE MINERAIS PESADOS

Após a coleta e tratamento-prévio das amostras foi realizada a análise de minerais pesados nas frações areia fina e muito fina, por meio do microscópio. O método de separação dos minerais pesados se deu com a utilização um líquido denso, bromofórmio (densidade = $2,89 \text{ g/cm}^3$). Essa etapa ocorreu no Laboratório de Estudos Sedimentológicos e Petrografia Sedimentar – LabESed, do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), coordenado pelo professor Doutor Carlos Conforti Ferreira Guedes e tendo como técnico responsável Daniel Cesar Antunes Paredes. O experimento foi conduzido pelo técnico e acompanhado pela autora, que utilizou as metodologias para a confecção das lâminas para análise de minerais pesados descrita a seguir.

Inicialmente, as amostras secas foram peneiradas segundo a classificação de Wentworth 1922 e as frações de areia fina e muito fina, de intervalo entre 0,125 e 0,62 milímetros, foram selecionadas pois correspondem à fração que apresenta maior concentração de minerais pesados (Remus *et al.* 2008). Para a separação dos minerais pesados foram utilizados os equipamentos ilustrados na Figura 2.3, além da capela de exaustão de ar, filtros de papel, bromofórmio e álcool 96°.

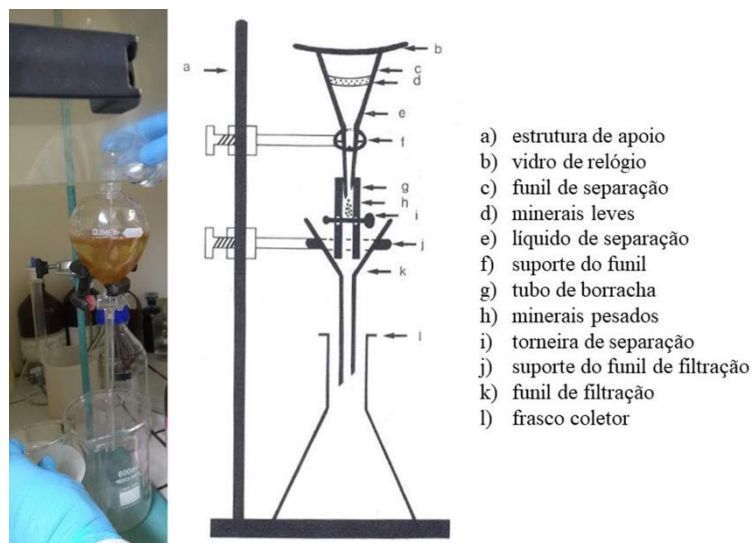


Figura 2.3: Estrutura para separação de minerais pesados por sedimentação gravitacional. Fonte: Modificado de Mange & Maurer (1992)

Dentro da capela de exaustão de ar e com a estrutura montada, conforme a Figura 2.3, deve-se encher o funil de vidro com a torneira fechada com o bromofórmio. Em seguida deve-se completar aos poucos o funil com a amostra selecionada. Espera-se que o ambiente do funil entre em harmonia entre o líquido e os minerais, de modo que os minerais mais densos que $2,89 \text{ g/cm}^3$ decantem e os mais leves fiquem em flutuação. Neste momento a torneira deve ser aberta, de modo que os minerais densos passem pelo orifício e, na sequência, a torneira deve ser fechada e os minerais coletados e limpos com álcool 96°. Os minerais que não passaram pelo orifício são coletados em outro funil com filtro de papel e limpos com álcool 96°. O bromofórmio concentra-se no frasco coletor e pode ser reutilizado. Por último, utilizou-se álcool 96° para limpar toda a estrutura montada para separação.

Para confecção das lâminas utiliza-se uma resina sintética com baixo índice de refração, chamada Bálsamo do Canadá ($n = 1,52 - 1,54$). Esse método consiste em espalhar a resina sobre a lâmina e despejar os minerais. Por último coloca-se uma lamínula em cima da lâmina para facilitar a identificação ao microscópio (Figura 2.4). Foram elaboradas quinze lâminas, referente aos quatro pontos da Área 2.

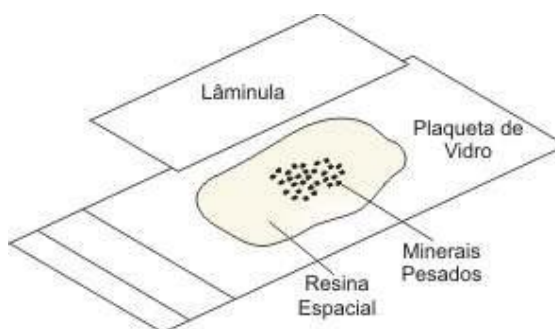


Figura 2.4: Esquema da confecção de lâminas petrográficas de minerais pesados

Posteriormente as lâminas foram analisadas utilizando-se o microscópio óptico de luz refletida *Nikon Eclipse E200*, do Laboratório de Estudos Costeiros (LECOST) do DEGEO da UFPR. Na identificação e separação das fases minerais, levou-se em conta sua forma cristalográfica, relevo, pleocroísmo, clivagem, birrefringência, ângulo de extinção, arredondamento e esfericidade.

CAPÍTULO 3

GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo situa-se na Bacia Sedimentar do Paraná, mais especificamente no leito do Rio Paraná, no qual ocorre os depósitos de aluviões do Quaternário. As imediações e o substrato da calha do rio são constituídos principalmente pelas unidades mesozoicas da Província Magmática do Paraná (Gondwana III, Jurássico Superior – Cretáceo Inferior) e dos Grupos Caiuá e Bauru (Bacia Bauru, Cretáceo Médio), conforme apresenta a Figura 3.1.

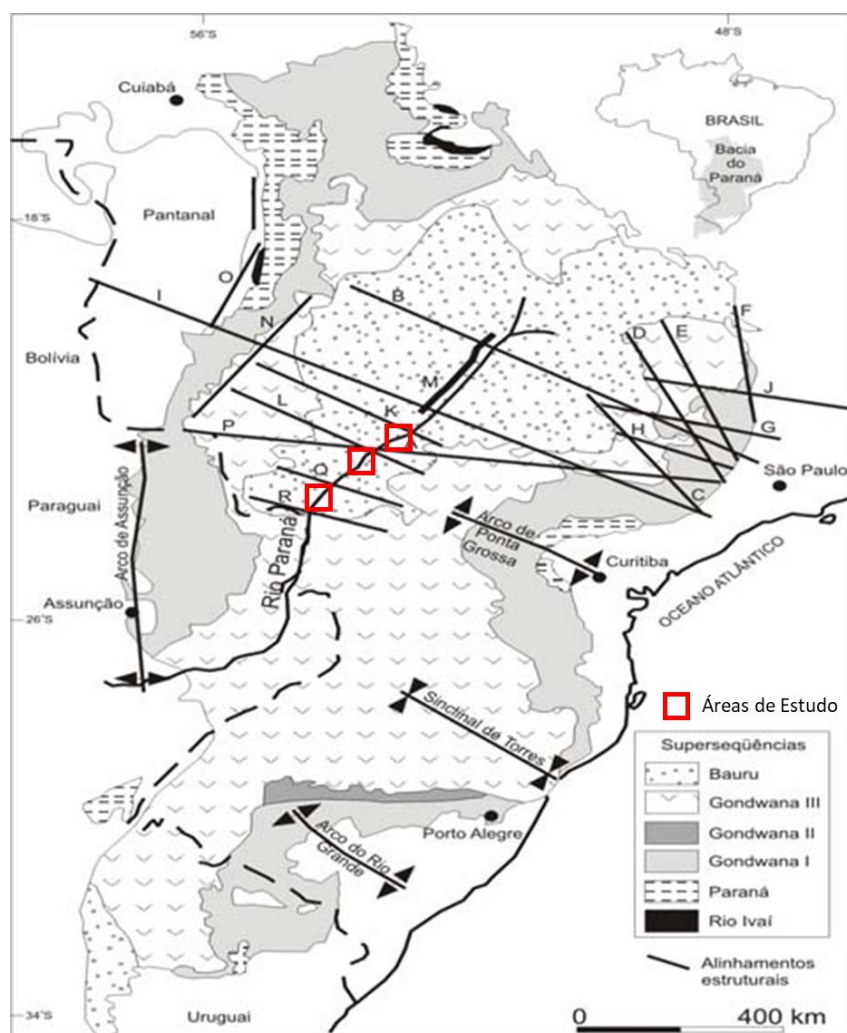


Figura 3.1: Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com distribuição temporal das unidades estratigráficas e principais alinhamentos estruturais. A – Rio Paranapanema; B– Rio Tietê; C– Ibatinga-Botucatu; D– Rio Moji-Guaçu; E– Ribeirão Preto-Campinas; F- Rifaina-São João da Boa Vista; G- São Carlos-Leme; H– Barra Bonita-Itu; I– Guapiara; J- Cabo Frio; K- São Jerônimo-Curiúva; L- Paranapanema; M- Sutura crustal de Três Lagoas; N- Serra de Maracaju; O- Sutura crustal de Coxim; P- Rio Alonzo; Q- Amambaí- Ribeirão do Veado; R- Rio Piquiri. Fonte: Modificado de Milani & Ramos (1998) e Riccomini (1997), Fulfaro e Perinotto (1994) *apud* Sallun *et al.* (2008)

3.1 BACIA DO PARANÁ

A Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica que ocupa uma área de 1,5 milhões de quilômetros quadrados e apresenta uma forma ovalada com seu eixo maior na direção NNE-SSO. Abrange, geograficamente, o Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina. Desenvolveu-se sobre o embasamento proterozoico de blocos cratônicos envolvidos por dobramentos e empurrões, relacionados ao fim do Ciclo Brasileiro. Possui formato alongado e o contorno atual define-se por limites erosivos relacionados à história geotectônica durante a deposição dos sedimentos. O limite Leste está relacionado ao soerguimento marginal do *rift*-atlântico e o Oeste é limitado pelo Arco de Assunção, uma feição de sobrecarga litostática em resposta ao cinturão andino (Milani *et al.* 2007, Milani *et al.* 2004).

O registro estratigráfico compreende um pacote sedimentar-magmático com espessura máxima de sete mil metros, coincidindo geograficamente o depocentro estrutural da sinéclise com a região da calha do Rio Paraná. Este conjunto de rochas representa a superposição de pacotes depositados, no mínimo, em três diferentes ambientes tectônicos. Milani (1997 *apud* Milani *et al.* 2007) reconheceu seis supersequências, na forma de pacotes rochosos materializados com dezenas de milhões de anos de duração e envolvidos por superfícies de discordância de caráter interregional.

Os três pacotes mais antigos relacionam-se a ciclos transgressivos-regressivos ligados a oscilações do nível do mar no Paleozoico, e correspondem às supersequências: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano) e Gondwana I (Carbonífero – Eotriássico). Os demais pacotes referem-se a deposições sedimentares continentais com rochas ígneas associadas, são as supersequências: Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). A Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná (Figura 3.2) ilustra a sequência deposicional.

Almeida (1980 *apud* Milani 1997) e Milani *et al.* (2007) tratam a última supersequência como pertencente à Bacia Sedimentar do Paraná, enquanto Fernandes & Coimbra (1996) excluem a sequência do registro sedimentar considerando-a uma nova bacia, a Bacia Bauru, argumentando que os sedimentos se acumularam em sítio deposicional de características singulares.

3.1.1 EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR

A Bacia do Paraná desenvolveu-se sobre blocos cratônicos circundados por cinturões de dobramentos e empurrões com orientação SW-NE de idade Proterozoica. A subsidência e acúmulo de sedimentos iniciou no Neo-ordoviciano, tendo como mecanismo impulsor da subsidência a reativação transtensional de lineamentos intraplaca causada pela colisão entre Gondwana e o terreno de Precordillera (Milani *et al.* 2007b).

As rochas sedimentares se depositaram sobre uma vasta área de escudo do continente Gondwana, agrupadas e formadas durante o Ciclo Brasileiro (Proterozoico Superior ao Ordoviciano). O supercontinente era composto por núcleos cratônicos (granulitos e granitos – *greenstones*), rodeados por cinturões moveis orogênicos (metassedimentos dobrados e empurrados, granitos e faixas de crátons remobilizados) e dispersamente coberto por remanescentes de bacias de antepaís (Zalán *et al.* 1991).

As seis supersequências que definem o arcabouço estratigráfico da Bacia do Paraná possuem, cada uma, dezenas de milhões de anos de duração. O registro total abrange o período de 450-65 milhões de anos, mas uma significativa parcela desse tempo está implícito nas lacunas que separam as várias supersequências (Milani *et al.* 2007, Milani *et al.* 2007b).

A primeira supersequência é a Rio Ivaí de idade neo-ordoviciano - eosiluriana, e assenta-se sobre os diversos domínios tectônicos do embasamento, imersos no golfo preenchido pelas águas do Panthalassa. É composta pelo Grupo Ivaí que envolve as formações, da base para o topo, Alto Garças, Iapó e Vila Maria, e registra o primeiro ciclo transgressivo-regressivo na Bacia do Paraná, com natureza predominantemente marinha e tendências transgressivas desde a base até a formação Vila Maria (Milani *et al.* 2007) (Referências).

A segunda supersequência, Paraná (Devoniano), foi depositada graças à subsidência gerada por um novo evento orogênico, a Orogenia Precordilheirana. Representa um ciclo transgressivo-regressivo com espessura máxima de 800 metros e imersos no golfo de águas oceânicas do Panthalassa. A maior parte da unidade encontra-se depositada sobre o Grupo Ivaí e localmente sobre o embasamento, e é representada pelo grupo Paraná que contém as formações Furnas e Ponta Grossa (Milani & Ramos 1998).

A supersequência Gondwana I é dada como o terceiro grande evento da bacia, registra o maior volume sedimentar e marca a saída do continente de um regime talassocrático para geocrático. A Orogenia Sanrafaélica foi a responsável pelo rearranjo estrutural do substrato da sinéclise, marcado na bacia pela ocorrência de material magmático com direções de sul para norte. Os pacotes estratigráficos caracterizam o grupo Itararé, a formação Aquidauana, o grupo Guatá, o grupo Passa Dois e as formações análogas Piramboia e Sanga do Cabral, compostas por depósitos fluviais e eólicos (Milani & Ramos 1998).

A quarta supersequência, Gondwana II (Meso-Neotriássico), é restrita à região sul da bacia, estendendo-se sobre o Rio Grande do Sul e Uruguai e é representada pela formação Santa Maria. Caracteriza-se por depósitos fluvio-lacustres, que incluem conglomerados, arenitos e folhelhos e importante fósseis de mamíferos. O fim da supersequência é marcado por grandes mudanças tectônicas, no qual houve um relaxamento do campo regional compressivo que atuava junto à margem do

supercontinente, gerando uma distensão generalizada culminando na quebra do Pangea, posterior quebra do Gondwana e na abertura do Oceano Atlântico (Milani *et al.* 2007) (Referências).

Nesse novo regime tectônico, foi depositada a supersequência Gondwana III, representada pelo grupo São Bento. O registro da grande desertificação do Gondwana, que precedeu a ruptura mesozoica do paleocontinente é representada pelo arenito eólico da formação Botucatu. A Província Magmática do Paraná se originou a partir do fenômeno de ativação tectonomagmática da Plataforma Sul-Americana, ligado à abertura do Atlântico Sul, que resultou na expressiva atividade magmática na bacia. Como consequência, houve a formação de extensos derrames de rochas básicas, um denso enxame de diques em algumas porções da bacia e múltiplos níveis de soleiras intrudidas segundo os planos de estratificação dos sedimentos paleozoicos. A colocação desses corpos intrusivos básicos foi propiciada pela reativação do Arco de Ponta Grossa, no qual houve um arqueamento que resultou no aparecimento de fraturas crustais paralelas.

A supersequência Bauru, Neocretácea, desenvolveu-se no centro-sul da Plataforma Sul-Americana e foi o último grande episódio deposicional da Bacia do Paraná. Os sedimentos depositaram-se sobre a espessa camada de rochas basálticas, em condições semiáridas nas bordas e desérticas no centro da bacia. Segundo Fernandes & Magalhães Ribeiro (2015), seu preenchimento deu-se em duas fases principais. A primeira ocorreu principalmente em condições desérticas e a segunda fase envolveu mais água e que, embora o clima fosse semiárido, refletiu em um sistema flúvio-eólico, formando os grupos cronorrelatos Caiuá (Formações Rio Paraná, Goio Erê e Santo Anastácio) e Bauru (Formações Uberaba, Vale do Rio do Peixe, Araçatuba, São José do Rio Preto, Presidente Prudente e Marília).

Os sedimentos recentes da Bacia Sedimentar do Paraná são depósitos aluviais e coluviais, com idade do Holoceno e natureza siliciclástica, resultam de processos pedogenéticos que refletem condições climáticas e comportamentos neotectônicos regionais relativamente calmos. Os depósitos aluviais representam sedimentos de canais e de subambientes associados, e estendem-se pelas planícies fluviais e vertentes ao longo dos rios constituintes das bacias (Suguio 2011).

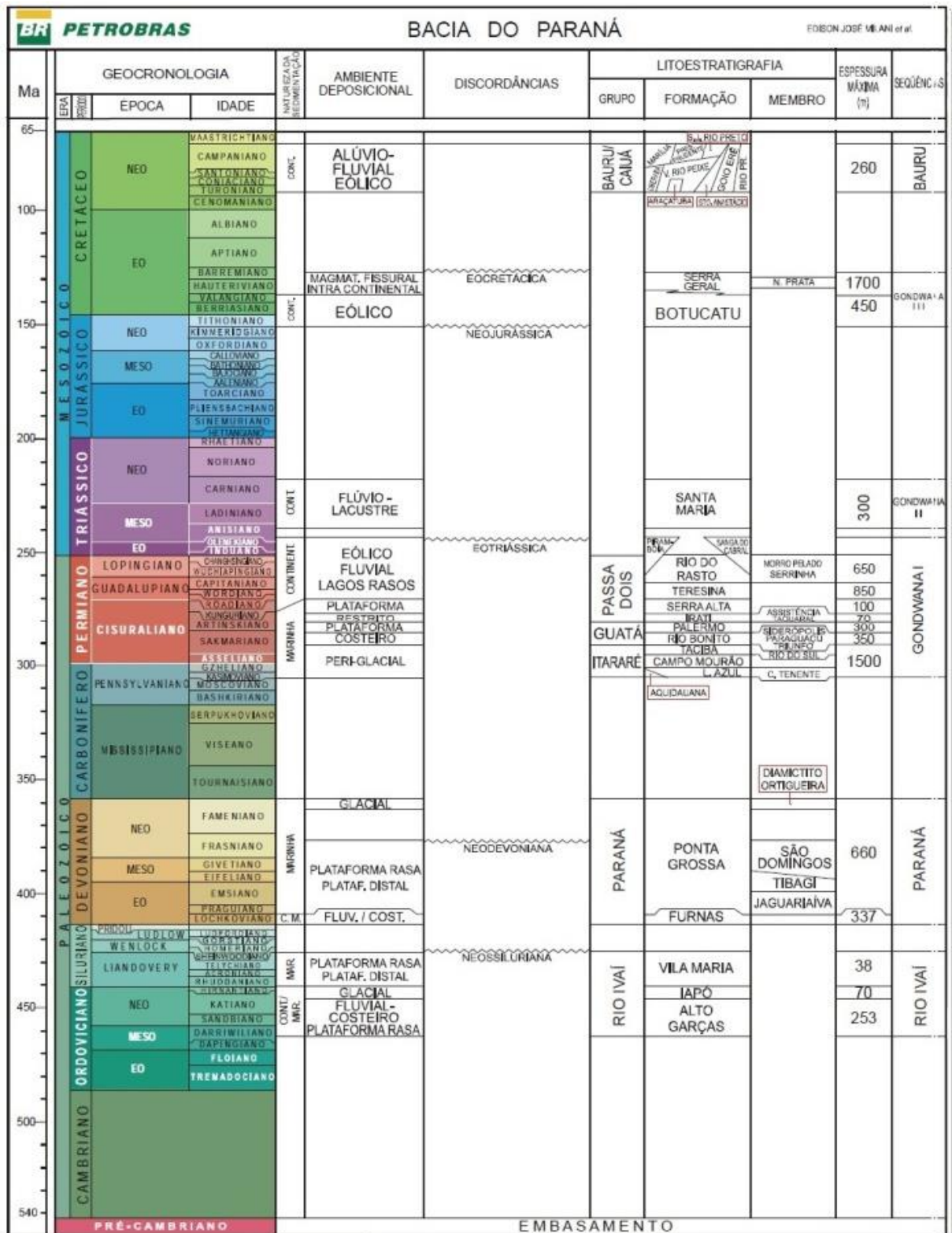


Figura 3.2: Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná. Fonte: Milani et al. (2007)

3.2 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é composta por unidades estratigráficas quaternárias que foram individualizadas a partir da abordagem aloestratigráfica apresentada por Sallun *et al.* (2007). Os sedimentos recentes foram categorizados como Alogrupo Alto Rio Paraná, constituído de depósitos coluviais da Aloformação Paranaíba e fluviais da Aloformação Paraná, foco desse trabalho (Figura 3.3).

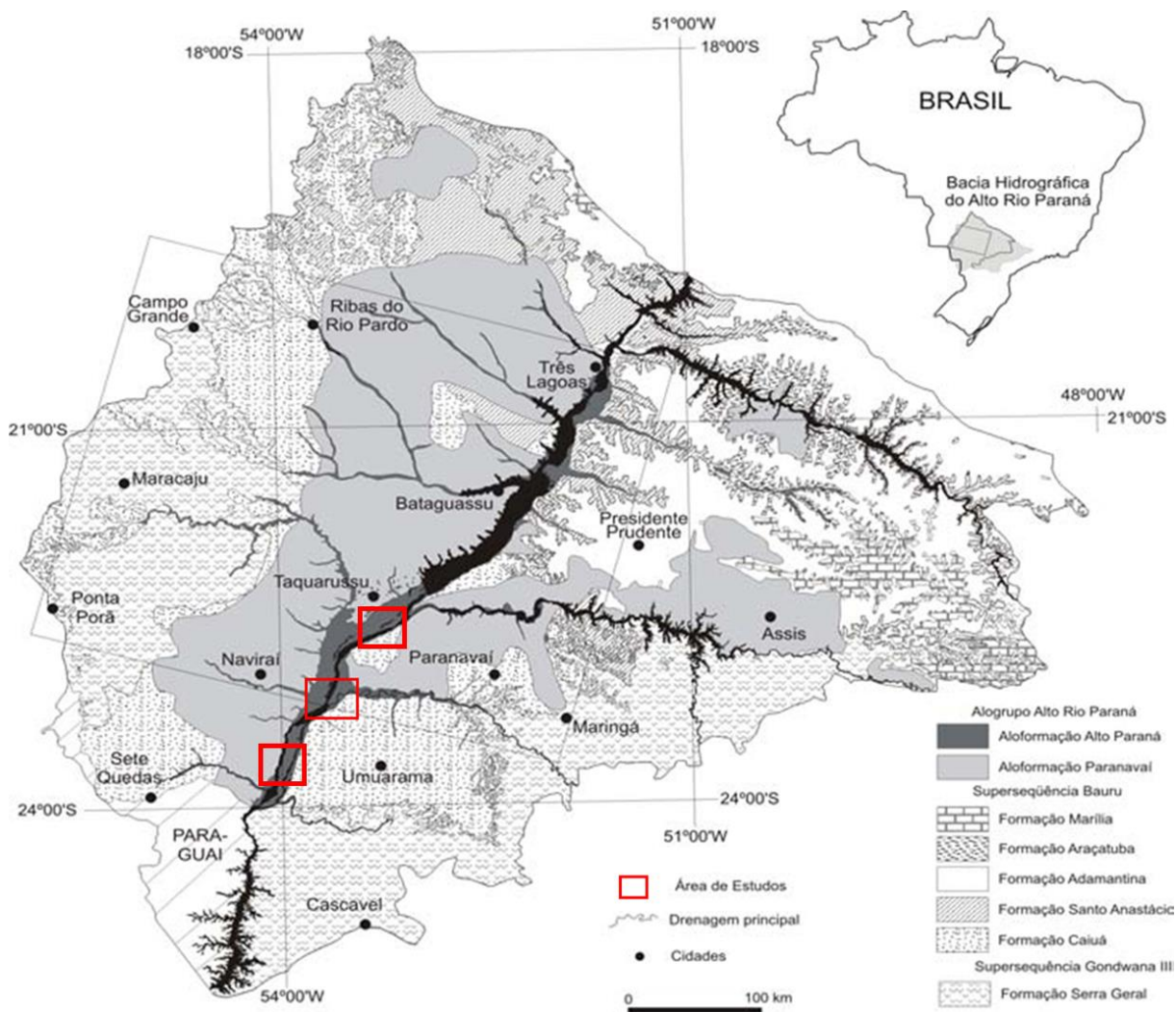


Figura 3.3: Mapa geológico da área de ocorrência do Alogrupo Alto Rio Paraná. Fonte: Modificado de Sallun *et al.* (2008).

O substrato geológico da calha fluvial do rio Paraná, em seu alto curso, é constituído por basaltos da Formação Serra Geral e por arenitos dos grupos Caiuá e Bauru. Os diferentes substratos rochosos impõem características distintas a diversas partes do rio. Nas áreas de ocorrência de basaltos o vale é mais fechado, com corredeiras e saltos, e nas áreas de arenitos do grupo Bauru o vale, por sua vez, é

bastante aberto. Em alguns locais as águas do rio tornam-se mais rápidas, devido à modificação imposta pela neotectônica ao longo de estruturas transversais ao curso do rio (Barros 2006).

A Aloformação Paraná apresenta terraços de origem fluvial associados à paleodrenagem, embutidos na Aloformação Paranaíba. Os terraços situam-se em diversos níveis topográficos (altos, médios e baixos) em ambas as margens do Alto rio Paraná e são compostos de depósitos arenáceos e rudáceos, com camadas de areia fina argilosa preta (rica em matéria orgânica) intercalada em camadas arenosas maciças (Sallun *et al.* 2007).

Stevaux (1993) identificou fácies sedimentares, características de diversos subambientes deposicionais, nos depósitos aluviais da Aloformação Paraná. Ocorrem, por exemplo, cascalhos maciços e estratificados com ou sem matriz arenosa, blocos ressedimentados, areias com estratificações cruzadas tabulares, sigmoidais e festonadas, além de areias com marcas onduladas, maciças, e/ou ricas em matéria orgânica, com laminação e estratificação plano-paralela e lama maciça. Esses sedimentos ocorrem como depósitos de canal, de lençol arenoso, de planície de inundação, de dique marginal, de bacia de inundação, de rompimento de dique marginal, de lagoas e barras arenosas de meandros.

O Rio Paraná tem padrão entrelaçado e é permeado por ilhas e barras formadas por assoreamento do material transportado em suspensão nas suas águas. Canais entrelaçados são formados pelo fluxo hidráulico, à medida que a correnteza deixa o material de frações granulométricas que não pode transportar. Além disso, a diminuição da declividade contribui para a carga de fundo ser composta por menores granulometrias. A deposição da carga de fundo gera barras que obstruem a corrente e a ramificam, processo que é facilitado quando as margens são facilmente erodíveis, com consequente aumento do suprimento detrítico (Miall 1981).

A associação faciológica dos períodos do sistema aluvial do rio Paraná envolve um inter-relacionamento das fácies da planície (pelitos laminados (Fl), pelitos maciços (Fm), areia com microestratificação (Sr) areia maciça (Sm) e orgânica (So)) com fácies de canal (areia estratificada (Sp, St), areia fina (Sh), seixos maciços (Gm) ou estratificados (Gp)) (Santos, 1997; Stevaux e Santos, 1998). Nas ilhas do rio Paraná é comum a exposição das fácies compostas por pelitos maciços ou laminados (Fl e Fm) sobrepostos por fácies arenosas (Sm e Sr) dos diques marginais (Santos 1997).

3.3 MINERAIS PESADOS ASSOCIADOS AO RIO PARANÁ

O rio Paraná exibe uma baixa diversidade mineralógica quanto à assembleia mineralógica de minerais pesados (Santos & Gasparetto 2008). Os minerais que ocorrem com maior frequência são o zircão, turmalina, estauroлита, cianita e epidoto, já o rutilo, silimanita, andalusita, granada, piroxênio e

anfیبólio são encontrados subordinadamente (Quadro 3.1). Os minerais pesados opacos representam 70% do total dos minerais pesados, sendo os mais comuns: magnetita, hematita e ilmenita.

Para esses autores, os sedimentos do sistema fluvial do rio Paraná proveem de duas áreas fontes: rochas cristalinas do maciço central brasileiro, definidas por rochas metamórficas de grau médio com rochas ígneas ácidas e pegmatitos, e por retrabalhamento de rochas sedimentares preexistentes, sugerindo uma história policíclica. Esses dados são corroborados por Fernandes (1992), que estudou os grupos Bauru e Caiuá e identificou uma assembleia mineral constituída por zircão, turmalina, estauroilita e, secundariamente, rutilo, cianita, granada e monazita, todos com alta esfericidade e arredondamento, sugerindo um retrabalhamento das formações Botucatu e Piramboia. Gasparetto & Santos (2005) estudaram o Grupo Caiuá e observaram a ocorrência de zircão, turmalina, estauroilita e rutilo, todos altamente arredondados. Atualmente, o rio Paraná, no seu curso superior, retrabalha seus depósitos formando um sistema fluvial de multicanaís, com carga de fundo predominantemente arenosa, que promove o desenvolvimento de inúmeras barras arenosas, com alta mobilidade (Santos 2001).

Quadro 3.1: Minerais pesados ocorrentes na bacia hidrográfica do rio Paraná, descritos segundo seu percentual de ocorrência em: Op. (Opacos); Cn. (Cianita), Si. (Silimanita), An. (Andalusita), Ep. (Epidoto), Es. (Estauroilita), Gr. (Granada), Zr. (Zircão), Tr. (Turmalina), Px. (Piroxênio), Af. (Anfibólio) e ZTR (Índice ZTR). As amostras (Am.) de 3 a 7 são oriundas da planície aluvial do rio Paraná, em Porto Rico (PR), de 8 a 13 foram coletadas na planície aluvial do rio Paraná, em Porto Primavera (SP) e a amostra 14, em Três Lagoas (MS). Fonte: Modificado de Santos & Gasparetto (2008).

Estratigrafia	Am.	Op.	Cn.	Si.	An.	Ep.	Es.	Gr.	Zr.	Rt.	Tu.	Px.	Af.	ZTR
Sistema anastomosado (Holoceno Médio)	3	60	5,5	3,7		15,6	15,6	4,6	1,8		16,5	12	24,8	18
	4	67	1,6	3,3		18,3	21,6	1,6	6,6	3,3	3,3	1,6	38,3	13,2
	5	78		1	1	23,3	19,4	6,7	24,2	1,9	7,7	1	13,6	33,8
	6	66	1	10,8	1	14,7	25,5	7,8	16,6	3,9	3,9	7,8	6,9	24,4
	7	67	2	2		19	11	21	36	3	2		13	41
	8	68,8	1,9	2,9		19,4	14,6	1	35	10,2	12		2,9	57,2
	9	66		3		5	16	1	41	10	18		6	69
	10	64	1		1	16,9	20,7	1	25,5	10,4	21,7		2,8	57,6
Sistema entrelaçado (Pleistoceno Superior)	11	73	4,5	9,1		7,3	23	8,2	9,1	7,3	20,1		10	36,5
	12	66	4,9	1,9	1	15,6	15,6	13,7	16,6	7,8	13,7		11,7	38,1
	13	74	0,9			13,2	16,6	43,3	28,4	0,9	5,8		0,9	35,1
	14	70,8	11,4	5,7			28,4		36,4	9	9			54,4

Quanto à ocorrência de minerais pesados na supersequência Bauru, destacam-se os trabalhos de Coimbra (1976), Suguio (1973) e Fernandes (1992). O resumo dos minerais descritos por cada autor pode ser visualizado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Minerais pesados da supersequencia Bauru. Fonte: Modificado de Coimbra (1976), Suguio (1973) e Fernandes (1992)

Ordem decrescente de frequência		
Coimbra (1976)	Suguio (1973)	Fernandes (1992)
Turmalina	Granada	Turmalina
Zircão	Zircão	
Granada		
Piroxênio	Turmalina	Zircão
Estaurolita		
Epidoto	Cianita	Estaurolita
Rutilo		
Hornblenda	Estaurolita	Rutilo
Cianita		
Sillimanita	Titanita	Cianita
Anatásio		
Titanita	Apatita	Granada
Perowskita		
Apatita	Sillimanita	Monazita
Monazita		

Coimbra (1976) e Suguio (1973) descreveram os minerais pesados da supersequência Bauru e sugeriram que minerais como zircão, turmalina e rutilo tem como origem rochas ígneas e metamórficas, mas encontram-se muito bem arredondados indicando como fonte os sedimentos das formações Furnas, Botucatu e Grupo Itararé. A perowskita forma-se em rochas alcalinas básicas e ultrabásicas e está concentrada na região do triângulo mineiro, na formação Uberaba. Já a ocorrência de augita e titano-augita evidencia a contribuição de rochas básicas da Província Magmática do Paraná. Coimbra (1976) ressalta a ausência da andaluzita no supergrupo.

Para Fernandes (1992) as características da assembleia de minerais pesados do supergrupo Bauru evidenciam que as rochas derivaram do retrabalhamento de rochas sedimentares mais antigas, das formações Botucatu e Piramboia. Em contrapartida, a presença de zircões e estaurolitas euédricas ou de bordas arredondadas indicam uma contribuição de rochas do embasamento metamórfico.

O autor ainda observou que o comportamento de alguns minerais varia da borda para o centro da bacia, como a frequência média de ilmenita e leucoxênio decresce no sentido das formações Santo Anastácio, Goio Erê e Rio Paraná devido ao fato do leucoxênio derivar de alterações de ilmenita. O comportamento dos minerais mais densos, como zircão e rutilo empobrecem para o centro da área, enquanto os minerais menos densos, como turmalina, granada, estaurolita e epidoto, procedem de modo inverso.

CAPÍTULO 4

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A integração das análises texturais e granulométricas dos sedimentos com estudo dos minerais pesados fornece uma base para a caracterização das possíveis áreas-fonte, bem como da sua história de transporte. Para a interpretação dos dados é de fundamental importância o embasamento bibliográfico sobre quais parâmetros avaliar e o seu porquê. Desse modo, espera-se resultados mais assertivos acerca das análises dos sedimentos.

4.1 ASPECTOS DOS SEDIMENTOS

Decifrar os indicadores texturais e granulométricos dos grãos é de fundamental importância para as análises qualitativas e quantitativas, e para isso é necessário compreender esses aspectos sedimentológicos. A seguir é apresentada uma revisão acerca das análises granulométricas, aspectos texturais e maturidade dos sedimentos, descrevendo os principais parâmetros a serem considerados.

4.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica permite estabelecer uma expressão quantitativa da distribuição dos grãos, onde os diferentes tamanhos podem ser classificados de acordo com os valores existentes em uma escala granulométrica padrão, que podem ser expressos em milímetros (mm) ou em unidade de “*phi*” (Φ) (Quinamo 2013). As características do tamanho dos sedimentos permitem entender a dinâmica do ambiente fluvial através de parâmetros estatísticos, como o diâmetro médio, desvio padrão, assimetria e curtose.

As informações contidas no banco de dados encontram-se classificadas segundo a escala granulométrica da NBR 7.211 (ABNT 2005), de acordo com a Tabela 2.1. Os parâmetros estatísticos de distribuição de tamanho seguem os métodos propostos por Folk & Ward (1957), Folk (1980) e os métodos de momentos (Quadro 4.1).

O método de Folk & Ward (1957) trata-se de um método gráfico para a determinação de medidas descritas na curva granulométrica, que constitui aproximações às medidas derivadas dos momentos da curva normal. Com os avanços tecnológicos, começaram a utilizar mais o método dos momentos. Trata-se de um método numérico, que busca reduzir uma equação integral em uma equação matricial, e é calculado por meio de programas e *softwares* (Dias 2004).

Quadro 4.2: Parâmetros Granulométricos Estatísticos, para os métodos de momentos: f (porcentagem do peso de cada frequência para cada tamanho de grão) e m (mediana de cada granulação de tamanho de grão em phi (Φ)). Fonte: Modificado de Folk & Ward (1957) e Folk (1980)

Métodos dos Momentos	Folk e Ward (1957)	Desvio Padrão (σ)	
Média (Ø)		σ	Classificação
$\frac{\sum fm_{\phi}}{100}$	$\frac{\phi16 + \phi50 + \phi84}{3}$	<0,35	muito bem selecionado
		0,35-0,50	bem selecionado
		0,50-1,00	moderadamente selecionado
		1,00-2,00	probavelmente selecionado
Assimetria (SK _I)		2,00-4,00	muito provavelmente selecionado
$\frac{\sum f(m_{\phi} - \bar{x}_{\phi})^3}{100\sigma_{\phi}^3}$	$\frac{\phi16 + \phi84 - 2\phi50}{2(\phi54 - \phi16)} + \frac{\phi5 + \phi95 + \phi50}{2(\phi95 - \phi5)}$	>4,00	extremamente mal selecionado
		Assimetria (SK _I)	
		SK _I	Classificação
Curtose (K _G)		-1,00 e -0,30	assimetria muito negativa
$\frac{\sum f(m_{\phi} - \bar{x}_{\phi})^4}{100\sigma_{\phi}^4}$	$\frac{\phi95 - \phi5}{2,44(\phi75 - \phi5)}$	-0,30 e -0,10	assimetria negativa
		-0,10 e +0,10	aproximadamente simétrico
		+0,10 e +0,30	assimetria positiva
		+0,30 e +1,00	assimetria muito positiva
		Curtose (K _G)	
		K _G	Classificação
Desvio Padrão (σ)		>0,67	muito plasticúrtica
$\sqrt{\frac{\sum f(m_{\phi} - \bar{x}_{\phi})^2}{100}}$	$\frac{\phi84 - \phi16}{4} + \frac{\phi95 - \phi5}{6,6}$	0,67-0,90	plasticúrtica
		0,90-1,11	mesocúrtica
		1,11-1,50	leptocúrtica
		1,50-3,00	muito leptocúrtica
		<3,00	extremamente leptocúrtica

A média (Ø) consiste no tamanho médio das partículas. O diâmetro médio é afetado pelas áreas-fonte do material, pelo processo de deposição e pela velocidade da corrente (Suguio 1973). O desvio padrão (σ) ou grau de seleção é uma medida de dispersão da amostra. Sedimentos bem selecionados implicam em grãos com pequena dispersão dos seus valores granulométricos, ou dos valores das medidas de tendência central. Com o aumento do transporte ou da agitação do meio as partículas de diferentes tamanhos tendem a ser separadas, sedimentos maiores tentem a ser depositados próximo às áreas-fonte com uma baixa seleção, enquanto sedimentos mais finos conseguem percorrer maiores distâncias e uma seleção mais efetiva (Folk & Ward 1957).

A assimetria (SK_I) representa o grau de deformação da curva de frequência simples para a direita ou para a esquerda, analisando-se a relação entre a moda, a média e a mediana. Quando os valores da moda, da média e da mediana forem iguais, a distribuição é considerada simétrica. No caso desses valores serem diferentes, a distribuição é assimétrica. A assimetria positiva ocorre quando o valor da média é superior ao valor da mediana que, por sua vez, é superior ao valor da moda. A assimetria

negativa ocorre quando o valor da média é inferior ao valor da mediana que, por sua vez, é inferior ao valor da moda (Suguio 1973).

A curtose (K_G) consiste na agudez dos picos nas curvas de distribuição de frequência, trata-se da razão entre a dispersão na parte central e nas caudas das curvas de distribuição. Os valores de curtose muito altos ou muito baixos podem sugerir que o material foi transportado de uma determinada área-fonte e depositado sem perder suas características originais (Folk & Ward 1957). A curva platicúrtica mostra um espalhamento de sedimentos mais finos e mais grossos nas caudas, indicando mistura de diferentes sedimentos, enquanto a ausência de espalhamento de sedimentos nas curvas leptocúrticas indica sedimentos bem selecionados na parte central da distribuição (Martins 2003).

4.1.2 MORFOLOGIA DOS SEDIMENTOS

A morfologia expressa as características externas dos grãos, abrangendo dois aspectos principais: a forma do contorno e a textura superficial (Ribeiro & Bonetti 2013). Acredita-se que os principais fatores envolvidos no desenvolvimento da forma das partículas são: forma original, estrutura do fragmento, durabilidade do material, natureza e rigor do agente geológico, e tempo ou distância pela qual a ação é estendida (Suguio 1973).

O arredondamento é determinado pelo grau de curvatura dos cantos de uma partícula. Enquanto a esfericidade tende a expressar o grau de aproximação da forma da partícula com uma esfera perfeita e independe do arredondamento. Foi utilizado o método de comparação visual, proposto por Powers (1953), conforme apresentado na Figura 4.1. O arredondamento é um bom índice de maturidade de um sedimento, somente areias retrabalhadas em vários ciclos sucessivos apresentam grãos moderadamente ou bem selecionados e a esfericidade reflete as condições no momento da deposição, é um fator importante na história do selecionamento granulométrico (Suguio 1973).

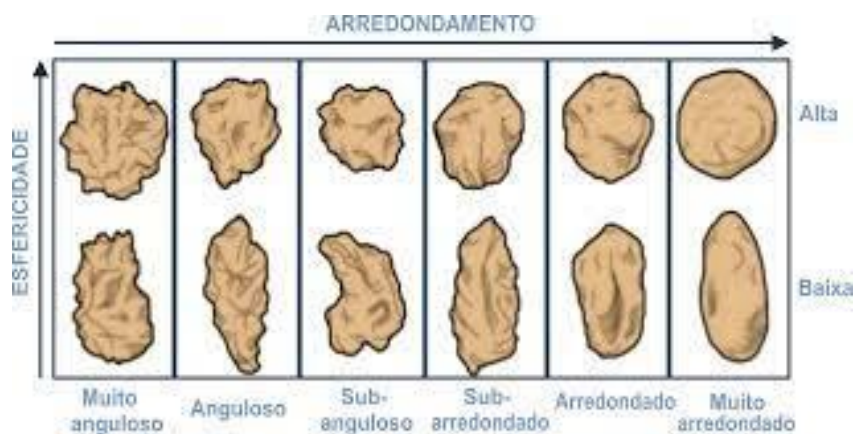


Figura 4.1: Classificação dos Sedimentos segundo o grau de arredondamento e esfericidade. Fonte: Modificado de Shepard (1967)

4.2 MINERAIS PESADOS

A compreensão sobre a assembleia de minerais pesados é uma ferramenta importante na caracterização das áreas-fonte dos sedimentos, principalmente quando associada a outras técnicas sedimentológicas, estratigráficas e geoquímicas. Uma associação de minerais pesados característicos está intimamente relacionada com a litologia de origem e, frequentemente, correlaciona-se com um terreno de origem identificável. Um levantamento das composições mineralógicas permite delimitar as províncias de minerais pesados, que se caracteriza-se pela presença de espécies importantes que estão ausentes ou são raras nas províncias adjacentes (Mange & Maurer 2012).

4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MINERAIS PESADOS

Os minerais pesados são denominados em razão da alta densidade em relação aos demais minerais, cuja densidade é superior a 2,9 gramas por centímetros cúbicos e compõem os constituintes menores e acessórios das rochas (Pereira *et al.* 2005).

Os minerais pesados são compostos por espécies de minerais opacos e translúcidos, os primeiros são compostos predominantemente por óxidos e sulfetos, que normalmente se integram na classe correspondente aos minérios enquanto os translúcidos consistem predominantemente de silicatos (Dias 2004). A origem desses minerais está relacionada diretamente com as diferentes litologias e contextos geológicos e devido à sua paragénese mineral fornecem informações importantes sobre a rocha-fonte (Morton & Hallswort 1994), como pode ser observado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Minerais pesados derivados de certos tipos de rochas. Fonte: Modificado de Pereira *et al.* (2005)

Rocha	Associação
Rochas ígneas ácidas	Biotita, Hornblenda, Monazita, Moscovita, Titanita, Zircão
Rochas ígneas básicas	Anatásio, Augita, Broquita, Cromita, Hiperstênio, Ilmenita, Leucóxênio, Olivina, Rutilo
Pegmatitos	Cassiterita, Fluorita, Topázio, Turmalina
Sedimentos Retrabalhados	Glauconita, Óxidos de ferro, Rutilo, Turmalina, Zircão (arredondado)
Rochas Metamórficas	Andalusita, Granada, Hornblenda alcalina, Hornblenda verde, Cianita, Silimanita, Estaurolita
Xistos e Gnaisses Pelíticos	Ilmenita, Almandina, Sillimanita, Cianita, Estaurolita
Rochas Metabásicas (fácies xisto verde)	Actinolita, Epidoto, Hornblenda, Clorita, Granada
Rocha Calciossilicática	Diopsídio, Tremolita-Actinolita, Granada, Scheelita
Anfibolitos	Hornblenda, Ilmenita

4.2.2 ESTABILIDADE DOS MINERAIS PESADOS

Um dos fatores mais importantes que devem ser considerados na análise de minerais pesados é a estabilidade mineralógica de cada espécie. A maioria dos minerais pesados tem baixo grau de resistência em condições de superfície devido a instabilidades químicas e mecânicas. De maneira genérica, quanto mais altas a temperatura e a pressão de formação do mineral, menos estável o mineral será sob condições de intemperismo (Pupin 1980).

No presente trabalho adotou-se a classificação de Pettijohn *et al.* (1973) *apud* Quinamo (2017) para os tipos de minerais pesados (Tabela 4.2). Para estes autores os minerais pesados são classificados quanto à estabilidade física e química em ultraestáveis, estáveis moderadamente estáveis, instáveis, muito instáveis.

Tabela 4.2: Ordem de estabilidade dos minerais pesados. Fonte: Pettijohn *et al.* (1973) *apud* Quinamo (2017)

Muito instáveis	Instáveis	Moderadamente estáveis	Estáveis	Ultra-estáveis
Olivina	Hornblenda	Epidoto	Apatita	Rutilo
	Actinolita	Cianita	Granada (pobre em ferro)	Zircão
	Augita	Granada (rica em ferro)	Estaurolita	Turmalina
	Dipsídio	Silimanita		
	Hipertênio	Titanita	Monazita	Anatásio
	Andalusita	Zoisita		

4.2.3 PARÂMETROS DE PROVENIÊNCIA

A análise de proveniência permite identificar a composição mineralógica e litológica das áreas-fonte, inferir sua localização geográfica, clima e relevo, e estimar a distância e tempo de transporte. A análise convencional de minerais pesados permite, por meio da assembleia mineralógica, indicar as respectivas áreas-fonte que contribuiriam para a proveniência, tendo em vista as paragêneses restritas de suas ocorrências nas rochas-fonte (Remus *et al.* 2008).

A composição dos conjuntos de minerais pesados pode ser fortemente influenciada por processos operacionais durante o transporte, deposição e diagênese. Como consequência, os dados convencionais de minerais pesados podem não ser um guia confiável para a natureza do material de origem de sedimentos. Certas suítes de minerais pesados não sofrem modificações significativas em relação às áreas-fonte, como as características varietais de espécies minerais individuais (Morton & Hallswort 1994).

4.3 AREIA COMO AGREGADO PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

O uso da areia para construção civil encontra-se dividido entre os subsetores de revenda (lojas de materiais de construção), concreto pré-misturado, fabrico de pré-moldados de concreto, argamassa, concreto asfáltico e material para compor a base/sub-base de rodovias (Brasil 2019). Segundo o site da Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil (ANEPAC *apud* Brasil 2019), o consumo de areia está dividido em 35% para argamassa, 20% concreteiras, 15% construtoras, 10% pré-fabricados, 10% revendedores/lojas, 5% pavimentadoras/usinas de asfalto, 3% órgãos públicos e 2% outros.

Segundo Fabro *et al.* (2011), o índice de consistência de argamassas é influenciado pela forma e textura das partículas de agregados e é maior para agregados com partículas mais esféricas. As principais classificações da areia como agregado para construção civil são quanto à dimensão dos grãos, massa específica e produção (Tristão 2005).

Quanto às dimensões, a NBR 7.211 (ABNT 2005) especifica os requisitos para recepção e produção dos agregados miúdos e graúdos destinados à produção de concreto e define a areia como agregado miúdo, cujos grãos passam pela peneira 4,8 milímetros e ficam retidos na peneira de 0,075 milímetros. As areias podem ser classificadas, quanto à massa específica (Bauer 1994), como leves (menor que 1 g/cm³), médias (entre 1 e 2 g/cm³) e pesadas (maior que 2 g/cm³).

Segundo a análise granulométrica é possível determinar a qualidade, o módulo de finura e o diâmetro médio da amostra através das diretrizes da NBR 7.211 (ABNT 2005). A areia para ser utilizada como agregado miúdo para concreto deve encontrar-se dentro das zonas utilizáveis e ótima (Tabela 4.3). A classificação do agregado segundo o módulo de finura varia de 2,20 a 2,90 na zona ótima, de 1,55 a 2,20 na zona utilizável inferior e de 2,90 a 3,50 na zona utilizável superior. O diâmetro médio da amostra também é uma característica que deve ser analisada.

Tabela 4.3: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo. Fonte: Modificado de ABNT (2005)

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3.310-1)	Porcentagens, em massa, retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	20	65	85	90
150 µm	85	90	95	100

A granulometria do agregado miúdo relaciona-se com a densidade específica do concreto, que se refere ao peso do agregado dividido pelo seu volume. Os grãos maiores levam a um aumento da densidade específica por possuírem grãos mais densos que permitem baixa permeação de água (Kiambigi *et al.* 2018, Vandhiyan *et al.* 2020). O módulo de finura é uma medida útil para determinar as proporções de agregados miúdos e graúdos a serem usados nas misturas pois afeta a propriedade de absorção de água e influência na resistência à compressão do concreto. Com a diminuição do módulo de finos a absorção da água do concreto e/ou argamassa secos aumenta, afetando a durabilidade da mistura. Com o aumento do módulo de finura a resistência à compressão aumenta consideravelmente e o consumo de água na produção da mistura também (Haque *et al.* 2012, Kiambigi *et al.* 2018 e Vandhiyan *et al.* 2020).

Para Kiambigi *et al.* (2018), a história do sedimento é importante para a caracterização do agregado para construção civil, diferentes fontes apresentam propriedades diferentes em virtude da formação geológica de origem. A composição mineral da areia influencia sua composição química que, por sua vez, afeta o desenvolvimento da resistência do concreto.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Foram analisadas amostras de sedimentos de 84 pontos localizados ao longo do Rio Paraná, na divisa dos estados do Paraná e Mato Grosso do Sul, nas áreas indicadas na Figura 1.1. As amostras coletadas na Área 2 foram direcionadas para os estudos de minerais pesados, as demais amostras foram coletadas em outras campanhas pela empresa e o material coletado já foi descartado. Foram analisadas 64 amostras da Área 1, 4 amostras da Área 2 e 18 amostras da Área 3. A seguir são descritos os resultados referentes à análise textural, granulométrica e de minerais pesados.

5.1 CARACTERÍSTICAS DAS FEIÇÕES TEXTURAL

As amostras apresentam-se com grau de arredondamento variando de subanguloso a arredondado e o grau de esfericidade predominantemente alto. A comparação das três áreas pode ser observada nas figuras 5.1 a 5.3, onde os resultados estão expressos em porcentagem.

As amostras coletadas na Área 1 são classificadas como areia média a fina e apresentam grau de arredondamento predominantemente subarredondado a arredondado (32 amostras), seguido de subarredondado (11 amostras), subanguloso (10 amostras), subanguloso a subarredondado (4 amostras), subarredondado a subanguloso (3 amostras) e arredondado (2 amostras). Quanto à esfericidade, 47 amostras apresentam alta, enquanto 15 amostras mostraram-se baixa.

Na Área 2, as amostras são sedimentos de granulação areia média a fina e apresentam-se com grau de arredondamento predominante de arredondado a subarredondado (3 amostras) e uma amostra encontra-se como subarredondado a arredondado. E todas as quatro amostras apresentam alta esfericidade.

Na Área 3 ocorrem areias que variam de cascalho a fina, apresentam predominantemente grau de arredondamento subanguloso a subarredondado (7 amostras) e arredondado (6 amostras), seguido por subarredondado a arredondado (3 amostras), subanguloso (1 amostra) e subarredondado (1 amostra). A esfericidade alta predomina (11 amostras) em relação à baixa (4 amostras), entretanto três amostras encontravam-se sem essa informação no banco de dados.

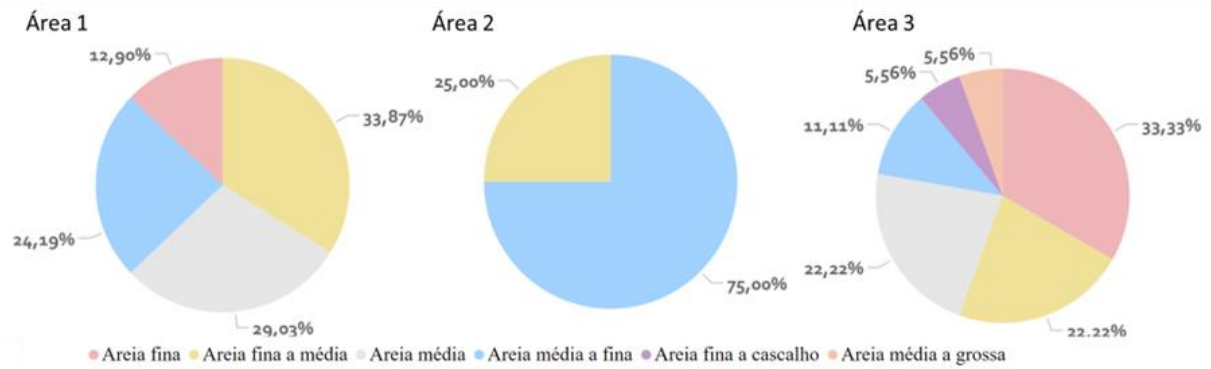


Figura 5.1: Granulometria predominante nas áreas de estudo segundo NBR NM ISO 3310-1 (ABNT 2010).

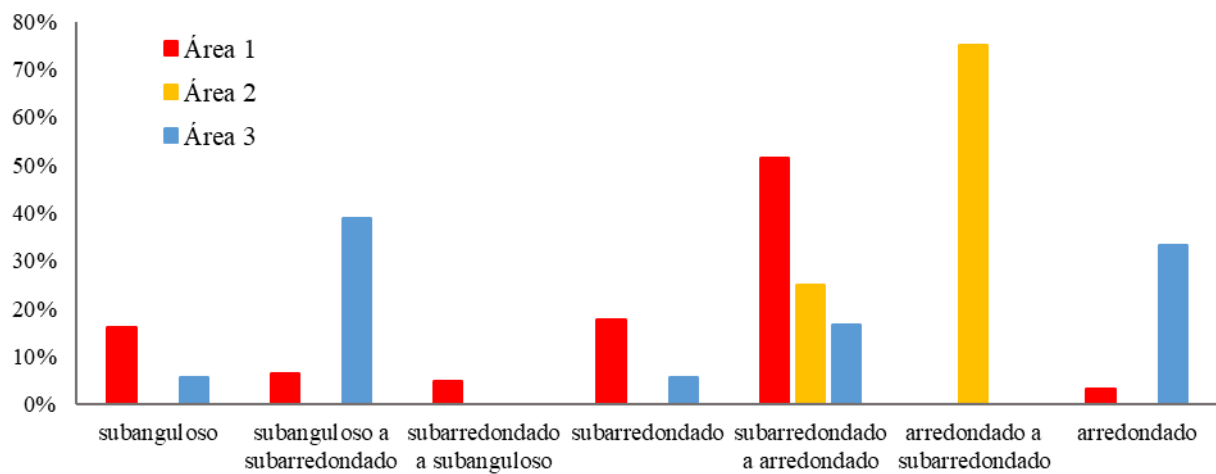


Figura 5.2: Grau de Arredondamento segundo Powers (1953).

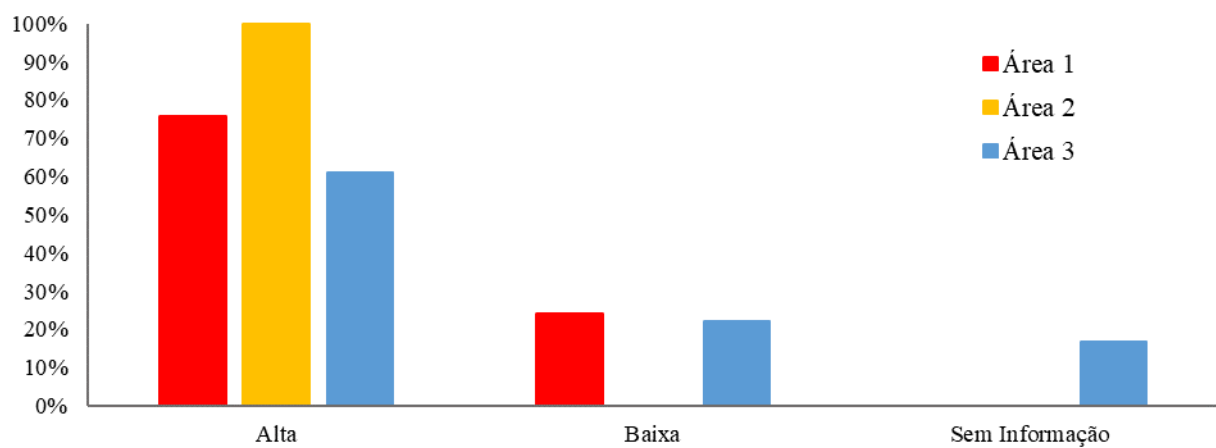


Figura 5.3: Grau de esfericidade segundo Powers (1953).

Com base nos valores obtidos no peneiramento foi possível classificar a curtose, assimetria e desvio padrão segundo os métodos Folk & Ward (1957) e momentos (Tabela 5.1). As amostras apresentam as seguintes características predominantes, segundo o método:

- Folk & Ward (1957): desvio padrão moderadamente selecionado a pobremente selecionado, assimetria moderadamente simétrico a assimetria negativa e curtose mesocúrtica a leptocúrtica (Figura 5.4);
- Momentos: desvio padrão moderadamente selecionado a pobremente selecionado, assimetria muito negativa e curtose extremamente leptocúrtica (Figura 5.5);

Tabela 5.1: Quantificação das amostras de acordo com os métodos de Folk & Word (1957) e Momentos.

	Folk & Ward (1957)				Momentos			
Desvio Padrão	Área 1	Área 2	Área 3	total	Área 1	Área 2	Área 3	total
muito bem selecionado	0	0	0	0	0	1	0	1
bem selecionado	1	1	0	2	1	0	0	1
moderadamente selecionado	51	3	13	67	51	3	11	65
pobremente selecionado	10	0	4	14	10	0	6	16
muito pobremente selecionado	0	0	1	1	0	0	1	1
Assimetria	Área 1	Área 2	Área 3	total	Área 1	Área 2	Área 3	total
assimetria muito negativa	3	0	2	5	44	2	11	57
assimetria negativa	18	1	11	30	9	0	1	10
aproximadamente simétrico	36	2	3	41	3	0	1	4
assimetria positiva	5	1	1	7	4	1	0	5
assimetria muito positiva	0	0	1	1	2	1	5	8
Curtose	Área 1	Área 2	Área 3	total	Área 1	Área 2	Área 3	total
plasticúrtica	8	1	2	11	0	0	0	0
mesocúrtica	29	2	7	38	0	0	0	0
leptocúrtica	25	1	8	34	0	0	0	0
muito leptocúrtica	0	0	1	1	5	0	3	8
extremamente leptocúrtica	0	0	0	0	57	4	15	76

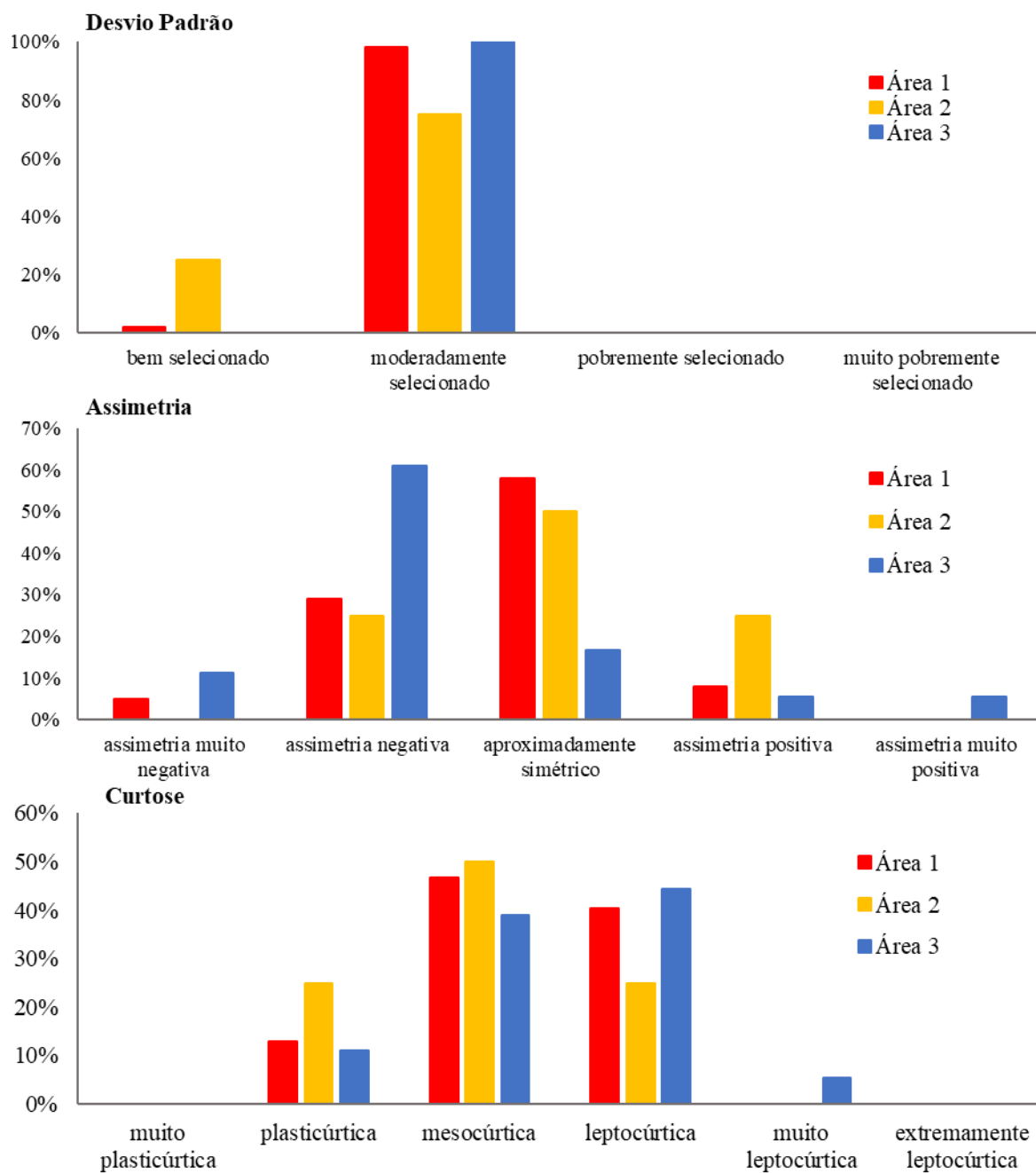


Figura 5.4: Classificação do desvio padrão, assimetria e curtose segundo Folk & Ward (1957).

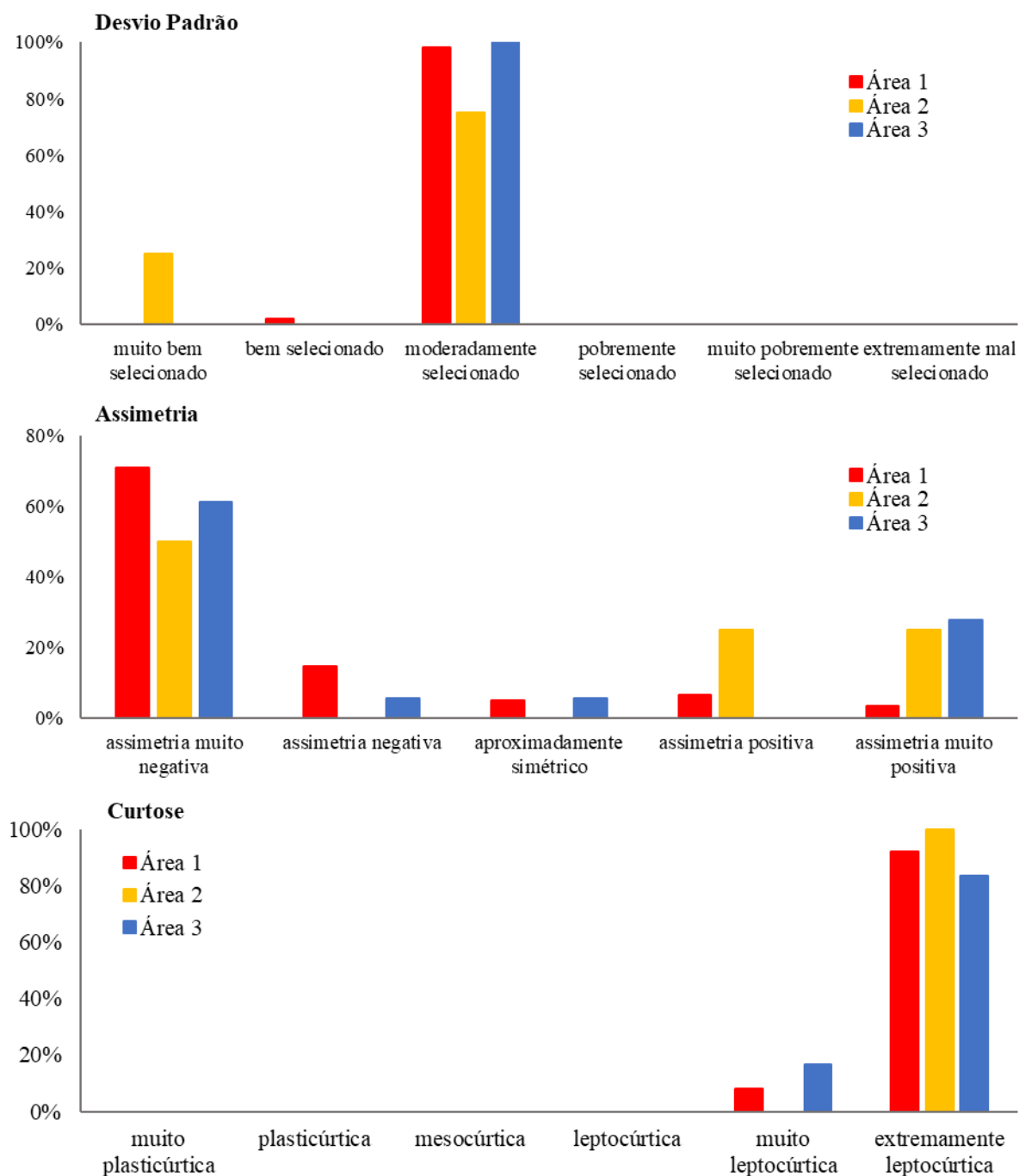


Figura 5.5: Classificação do desvio padrão, assimetria e curtose segundo métodos de momentos.

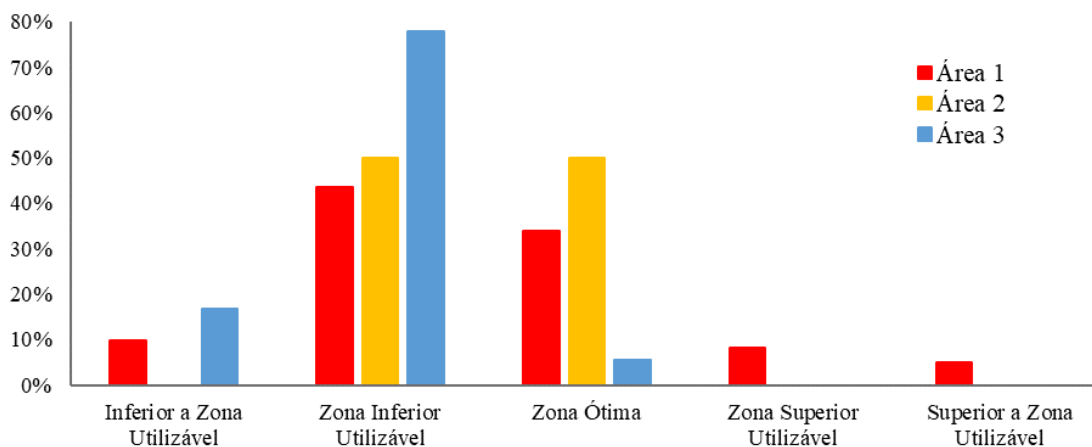
5.2 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS MIÚDOS

Analisando a Massa Específica Real (Tabela 5.2) observa-se que as amostras são majoritariamente classificadas como pesadas. Na Área 1, 61 amostras são pesadas e uma é classificada como média. Na Área 2, as quatro amostras são pesadas e na Área 3, 17 amostras são pesadas e 1 é média.

Tabela 5.2: Classificação quanto a Massa Específica segundo Bauer (1994)

Massa Específica Real	Área 1	Área 2	Área 3
Média	1,61%	-	5,56%
Pesada	98,39%	100%	94,44%

As amostras apresentam módulo de finura variando do intervalo inferior a zona inferior ao superior a zona superior e massa específica predominantemente alta. Segundo a NBR 7.211 (ABNT 2005), os dados foram classificados segundo o módulo de finura (Figura 5.6). As amostras da Área 1 enquadram-se na zona utilizável inferior (27 amostras), zona ótima (21 amostras) e zona utilizável superior (5 amostras), extrapolam o limite inferior e superior 6 e 3 amostras, respectivamente. Na área 2, observou-se que as amostras mantiveram na zona ótima (2 amostras) e zona utilizável superior (2 amostras). E na Área 3, predomina a zona utilizável inferior (14 amostras, seguida da zona ótima (1 amostra) e inferior a zona utilizável (3 amostras).

**Figura 5.6:** Classificação do Módulo de Finura segundo NBR 7.211 (ABNT 2005).

Quanto à granulometria, os dados foram classificados de acordo com a NBR 7.211 (ABNT 2005) nos limites inferiores e superiores (Figura 5.7). Observa-se que na Área 1 as amostras enquadram-se dentro do limite inferior a superior, o desvio mais proeminente é em relação ao superior. As amostras da Área 2 apresentam o mesmo comportamento. Na Área 3, uma amostra encontra-se totalmente abaixo do limite inferior, duas amostras enquadram-se praticamente fora do limite superior e as demais encontram-se com comportamento semelhante às Áreas 1 e 2.

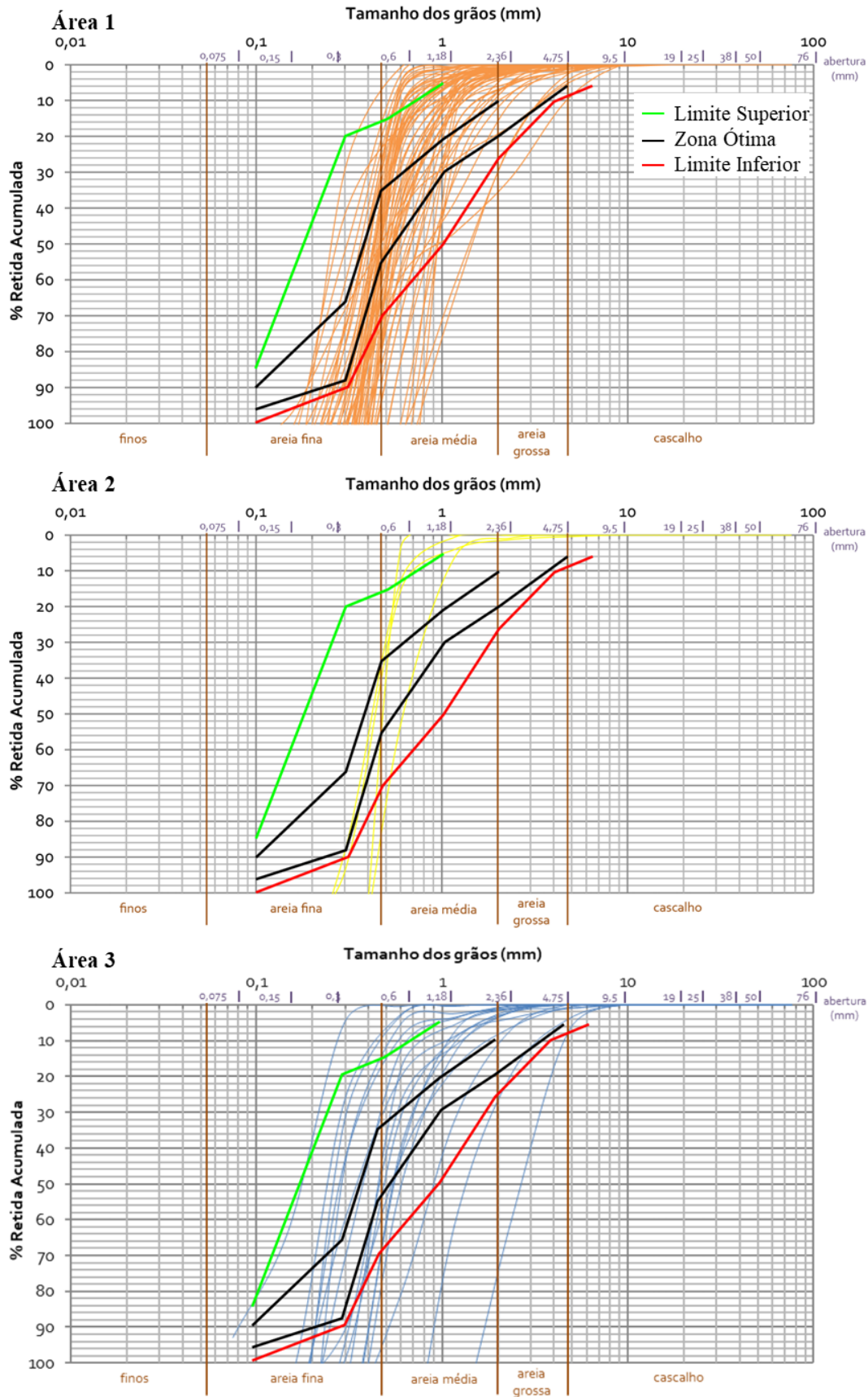


Figura 5.7: Classificação Granulométrica das áreas com os limites inferiores e superiores segundo ABNT (2005).

5.3 CARACTERÍSTICAS DOS MINERAIS PESADOS

No total foram contados 576 grãos translúcidos de quatro amostras na Área 2, onde foram identificadas dez espécies minerais, sendo sua variação quantitativa em contagem de grão representadas na Tabela 5.3. No montante das lâminas a maioria dos grãos são opacos, representando: 89% na AM-01, 83% na AM-02, 71% na AM-03 e 74% na AM-04. A distribuição qualitativa dos minerais dos grãos translúcidos está representada na Figura 5.8. A estaurolita predomina, seguida da cianita enquanto que rutilo e zircão aparecem em menores proporções. A seguir será apresentada a descrição dos minerais pesados identificados (Figura 5.9).

Tabela 5.3: Quantificação de minerais pesados encontrados, onde: Z-zircão, R-rutilo, T-turmalina, Gr-granada, Es-estaurolita, C-cianita, S-silimanita, Ep-epidoto, Px-piroxênio e Af-anfibólio

Amostra	Z	R	T	Gr	Es	C	S	Ep	Px	Af
AM-01	4	3	22	5	65	9	3	12	5	1
AM-02	10	4	8	11	54	13	7	11	10	5
AM-03	11	6	7	6	77	25	12	18	23	15
AM-04	4	4	5	16	33	26	2	8	14	2

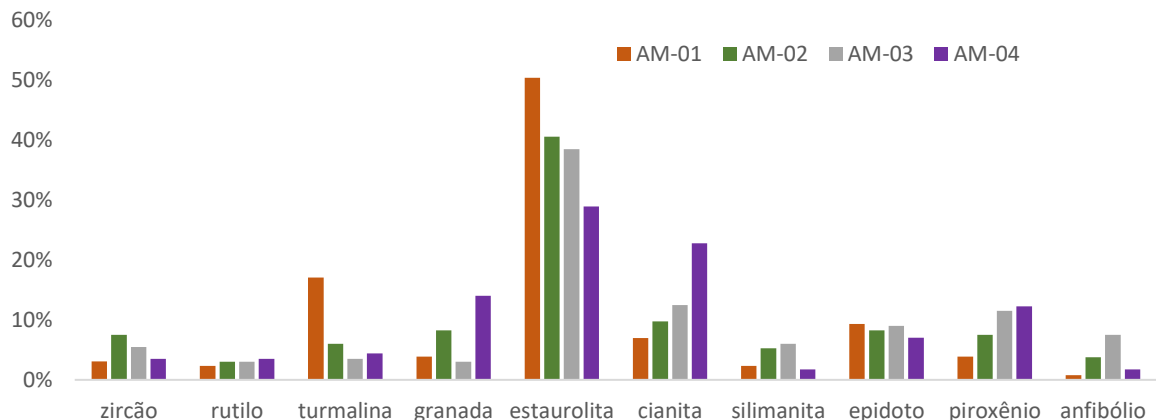


Figura 5.8: Porcentagem de minerais pesados na Área 2

Zircão: grãos incolores, subeuédricos na forma de prismas alongados, não apresentam pleocroísmo, birrefringência alta, relevo altíssimo, extinção reta, com ausência de clivagem. Alguns grãos encontram-se mais arredondados.

Rutilo: grãos de cor marrom escuro, anédricos a subeuédricos, os quais apresentam grão na forma de prismas alongados com arestas arredondadas. O pleocroísmo e birrefringência são fracos, relevo altíssimo, cor de interferência semelhante à cor natural, extinção reta, clivagem indistinta.

Turmalina: são grãos de cor castanho a cinza e azul escuro, anédricos na forma de esferas, bem arredondados. São altamente pleocróicos, com birrefringência moderada, com relevo alto e com ausência de clivagem.

Granada: apresentam-se como grãos incolores, anédricos. Não apresentam pleocroísmo, relevo alto e isotrópicos, normalmente observam-se inclusões de outros minerais não identificados.

Estauroлита: são marrons a amarelo âmbar, subeuédricos na forma prismas alongados, mas também ocorrem formas irregulares anédricos com bordas serrilhadas. Apresenta pleocroísmo fraco, birrefringência moderada a alta, relevo médio a alto, extinção oblíqua e clivagem indistinta. Alguns grãos apresentam impregnação de óxido de ferro.

Cianita: grãos incolores, subeuédricos a euédricos na forma tabular alongada. Suas características ópticas são birrefringência baixa, relevo médio, extinção oblíqua e normalmente é possível identificar dois planos de clivagem, mas em alguns casos observa-se os três planos. Alguns grãos apresentam impregnação de óxido de ferro e inclusões de outros minerais não identificados.

Silimanita: são incolores, subeuédricas na forma de agregados fibrosos. Não apresenta pleocroísmo, birrefringência moderada a baixa, relevo médio a alto, extinção reta e clivagem indistinta.

Epidoto: são grão de coloração verde, anédricos e apresentam pleocroísmo fraco, birrefringência alta, relevo alto, extinção reta e ausência de clivagem.

Piroxênio: são grão de coloração verde a verde amarelada, anédricos a subeuédricos na forma de prismas. Apresentam pleocroísmo fraco, birrefringência alta, relevo alto, extinção oblíqua e ausência de clivagem. Alguns grãos apresentam impregnação de óxido de ferro.

Anfibólio: são grãos de coloração verde azulado a verde amarelado, anédricos a subeuédricos na forma de prismas. Apresentam pleocroísmo fraco, birrefringência alta, relevo alto, extinção oblíqua e ausência de clivagem.



Figura 5.9: Minerais identificados na Área 2 de estudo.

CAPÍTULO 6

DISCUSSÃO

Será discutido a relação entre as características texturais dos sedimentos com as propriedades da areia como agregado miúdo para a construção civil. Posteriormente será analisado a relação dessas características com o local de deposição afim de identificar onde se localizam as melhores areias. E por fim procurou-se o significado a assembleia de minerais pesados, correlacionando suas características atuais com a área fonte.

6.1 FEIÇÕES TEXTURAIS *VERSUS* QUALIDADE DE AGREGADO MIÚDO

Comparando os resultados obtidos acerca do desvio padrão, assimetria e curtose (Figuras 5.4 e 5.5) é nítida a discrepância entre os métodos de Folk & Ward (1957) e de momentos. Dias (2004) e Alcántaro-Carrió (2001) discutem sobre o assunto e argumentam que ambos os métodos são válidos e não existe um melhor que o outro, são análises diferentes que consequentemente irão gerar resultados diferentes. O método gráfico, de Folk & Ward (1957), obriga a análise visual da curva granulométrica e facilita a detecção de eventuais erros, além de proporcionar um maior conhecimento das particularidades da curva. Os métodos matemáticos, de momentos, são análogos aos métodos da física mecânica, onde a força é substituída pela frequência de determinada classe, o ponto médio refere-se ao ponto médio da classe e o ponto de rotação é arbitrário, sendo geralmente o começo da curva.

Entretanto, é nítido que houve uma discrepância nos resultados da assimetria e curtose. Swan *et al.* (1979) argumentam que o método dos momentos descreve melhor os valores de assimetria e curtose, uma vez que mostram uma precisão maior dos parâmetros entre os intervalos de peneiramento de 1Φ para $0,25\Phi$. Ponçano (1985) concorda, mas conclui que é mais conveniente a utilização do método de Folk & Ward (1957), por serem mais compatíveis com as classes granulométricas obtidas durante o peneiramento.

As areias com uso na construção civil devem ser classificadas com um agregado miúdo e seguir as diretrizes da NBR 7.211 (ABNT 2005). Os resultados mostram que majoritariamente as amostras são classificadas como fina a grossa (Figura 5.1), variando de 4,75 até 0,075 milímetros. Entretanto algumas podem variar de areia fina a cascalho. Entretanto, o cascalho é classificado fora da zona utilizável do agregado miúdo, mas podendo ser utilizadas como agregados graúdos para a construção civil.

Observando as curvas de distribuição granulométrica (Figura 5.7), as amostras têm um comportamento mais uniforme que os padrões definidos pela normativa. Essa uniformidade é interpretada pela alta declividade da curva, aproximando-se da vertical, enquanto os limites abrangem uma faixa maior de valores, com uma curva mais suave. Essas informações são reafirmadas quando se analisa os dados do desvio padrão (Figura 5.4 e 5.5), onde as amostras são classificadas majoritariamente como moderadamente selecionadas, chegando a muito bem selecionada pelo método dos momentos. As amostras dispostas majoritariamente fora da zona utilizável, principalmente nas Áreas 1 e 3, apresentam módulos de finuras menores, implicando nas propriedades e diminuindo a qualidade do produto na construção civil. O material *in natura* disposto fora da zona utilizável pode passar por um peneiramento simples, separando o que se encontra fora do aceitável, entretanto essa etapa aumenta a complexidade da extração e o custo de produção.

Analisando o módulo de finura, os resultados mostram que a grande parte das amostras estão dentro da zona utilizável e ótimo de finura (Figura 5.6). Isso significa os produtos formado a partir desse minério tem as características recomendadas para um agregado miúdo. Entretanto, as amostras das Áreas 1 e 3, descritas anteriormente, podem apresentar um consumo excessivo de água. Isso ocorre porque quanto menor o módulo de finura maior a absorção de água na mistura, afetando sua durabilidade. Enquanto dentro dos limites, a quantidade de água absorvida proporciona a melhora da resistência à compressão (Haque *et al.* 2012, Kiambigi *et al.* 2018 e Vandhiyan *et al.* 2020).

Segundo Sabiha *et al.* (2016) a granulometria e o módulo de finura da areia estão entre os principais fatores que afetam o desempenho do concreto fresco e endurecido. Se o agregado miúdo for muito grosso, produzirá sangramento, segregação e aspereza, mas se for muito fino, a demanda por água aumentará. Misturas uniformemente distribuídas geralmente levam a uma maior compactação, resultando em concreto com maior densidade e menor permeabilidade, e maior resistência à abrasão.

A análise da curtose permite inferir uma correlação entre a proporção de grãos finos e grossos, amostras com comportamento mais plasticúrtico apresentam uma curva de distribuição suave, enquanto um comportamento mais leptocúrtico indica um grau de seleção maior na parte central da distribuição. Relaciona-se também com a assimetria: amostras com assimetria muito positiva ou negativa indicam que a distribuição da curva granulométrica é mais suave, contribuindo para o equilíbrio entre grãos finos e grossos nas misturas. Considerando os resultados segundo Folk e Ward (1957), as amostras apresentam uma tendência centralizada, tangendo para um comportamento leptocúrtico e simétrico enquanto o método dos momentos descreve as amostras de modo muito leptocúrtico e com predomínio dos extremos da assimetria muito negativa e muito positiva.

Quanto à massa específica, as amostras enquadram-se majoritariamente com a massa específica pesada (Tabela 5.2), sendo esse resultado considerado satisfatório por Tristão (2005), uma vez que misturas que apresentam menores concentrações de água possuem maiores massas específicas.

Pecebe-se que a água está intimamente relacionada com a granulometria e com o grau de finura e é um parâmetro que condiciona a qualidade do material, seja para o concreto ou para argamassa.

Analizando os parâmetros texturais dos sedimentos, o grau de arredondamento e esfericidade são os principais fatores que condicionam a qualidade do agregado miúdo. Os resultados mostram que as amostras são classificadas quanto ao grau de arredondamento variando de subanguloso a arredondado (Figura 5.2) e com esfericidade predominantemente alta (Figura 5.3). Segundo Fabro *et al.* (2011), os índices de consistência de argamassas são influenciados pela forma e textura dos grãos e são maiores para agregados com partículas mais esféricas. Quanto mais alongados e angulosos, maior será o consumo de cimento na mistura e, quanto mais angulosos, melhor o entrosamento entre as partículas individuais, contribuindo para a resistência do concreto. Entretanto, grãos angulosos tem maior área superficial e exigem uma maior quantidade de água para a mesma consistência de concretos, o que pode ocasionar uma diminuição na resistência à compressão. Desse modo, verifica-se que deve haver um equilíbrio no grau de arredondamento, de modo que não consuma uma quantidade muito maior de cimento nem uma quantidade exagerada de água.

A água é um dos principais fatores que influenciam no produto do agregado miúdo, deve-se buscar uma relação de equilíbrio entre a distribuição granulométrica, módulo de finura, massa específica e grau de arredondamento e esfericidade. A areia não será descartada por ter um comportamento anômalo em um parâmetro, mas seu uso pode ser limitado.

6.2 ASPECTOS TEXTURAIS VERSUS AMBIENTE DEPOSICIONAL

A relação entre localização do sedimento no leito do rio com seus aspectos texturais encontra-se apresentada nas Figuras 6.1 a 6.3. Analisando a imagem de satélite foi possível correlacionar os resultados com a sua posição no rio, na qual foram interpretados que os sedimentos são oriundos do fundo de calha, barras laterais, longitudinais e transversais. As amostras dispostas nas barras apresentam diâmetro médio inferior em relação à calha do rio, o qual está relacionado com a energia do sistema. Nas barras a energia é inferior permitindo a deposição de partículas mais finas que estavam sendo transportadas por suspensão e saltação e, na calha, devido à energia superior, não se permite que tais partículas se depositem.

Entretanto, não foi verificado um padrão dos parâmetros de desvio padrão, assimetria, esfericidade e arredondamento de acordo com o posicionamento. Para esse critério os dados apresentam-se desordenados, indicando que outros fatores, como a velocidade de fluxo da água pode estar controlando a deposição dos grãos.

Em contrapartida, as figuras mostram uma variação sutil das feições texturais nas áreas. Enquanto na Área 1 predominam sedimentos bem selecionados, com grau de arredondamento tendendo para arredondado e subarredondado e diâmetro médio variando de 0,27 a 1,60 milímetros, na Área 3 os sedimentos ocorrem majoritariamente como moderadamente selecionados, com tendência subangulosa e com diâmetro médio entre 0,18 e 5,02 milímetros. Os demais parâmetros não apresentam modificações significativas.

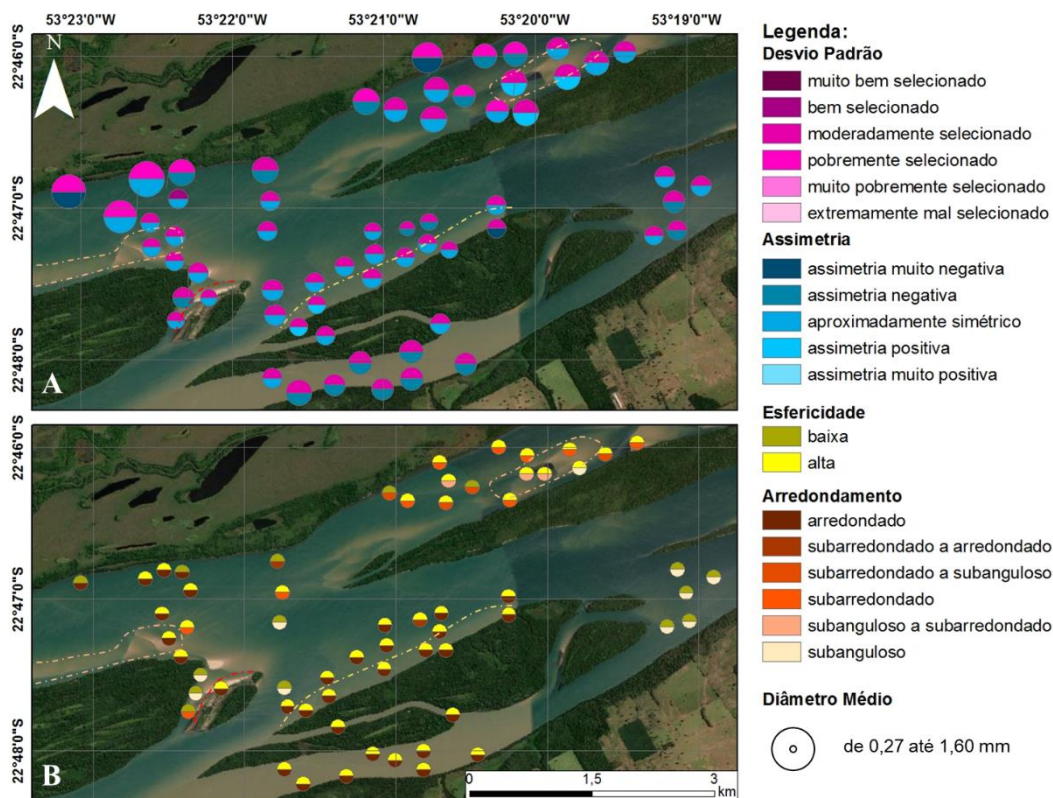


Figura 6.1: Feições (A) granulométricas e (B) texturais dos sedimentos da Área 1, de acordo com o leito do rio, onde linha rosa representa barra longitudinal, amarela barra transversal e vermelha barra lateral.

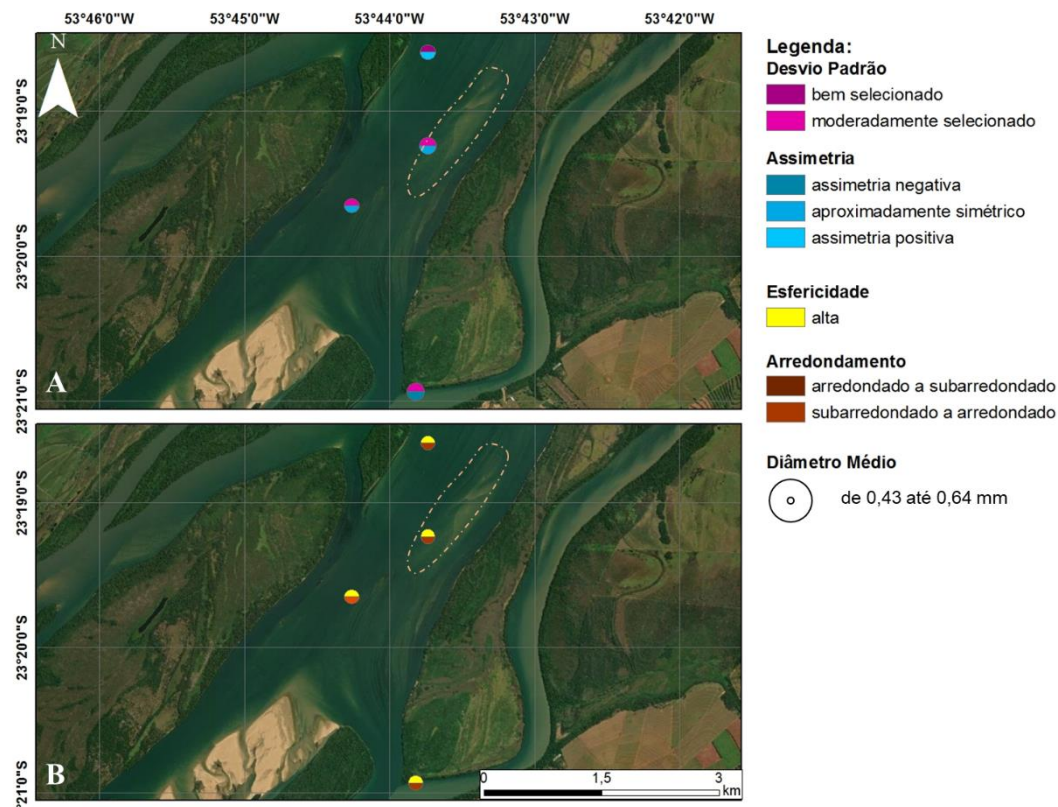


Figura 6.2: Feições (A) granulométricas e (B) texturais dos sedimentos da Área 2, de acordo com o leito do rio, onde linha rosa representa barra longitudinal.

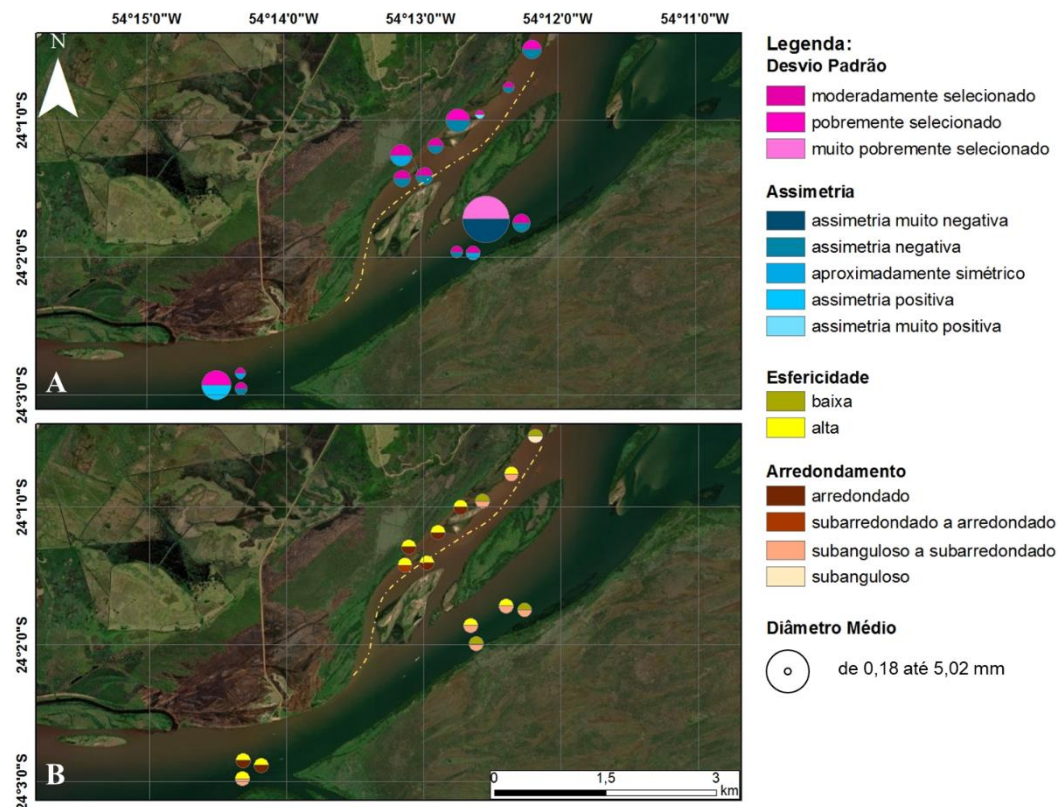


Figura 6.3: Feições (A) granulométricas e (B) texturais dos sedimentos da Área 3, de acordo com o leito do rio, onde linha amarela representa barra transversal.

O predomínio de amostras moderadamente selecionadas e com diâmetro médio maior na Área 3 em relação a Área 1, onde dos resultados são mais dispersos (Figura 6.4) pode estar relacionada com a redução da declividade e do fluxo de água, imposta pelo barramento da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Corroborando com isso, nessa área ocorre o predomínio de areia fina. Com a diminuição do fluxo esses sedimentos, que se encontravam em suspensão ou saltação, podem ser depositados, ao contrário do que ocorre nas outras áreas onde o fluxo é maior, diminuindo a frequência de deposição dessa classe granulométrica. Para Rocha (2010) isso indica que, quando aumenta o fluxo nos sistemas, deve haver a mobilização gradual dos grãos mais finos, diminuindo a frequência desses. Conforme os materiais mais finos são mobilizados pelo fluxo, os mais grossos vão sendo descobertos.

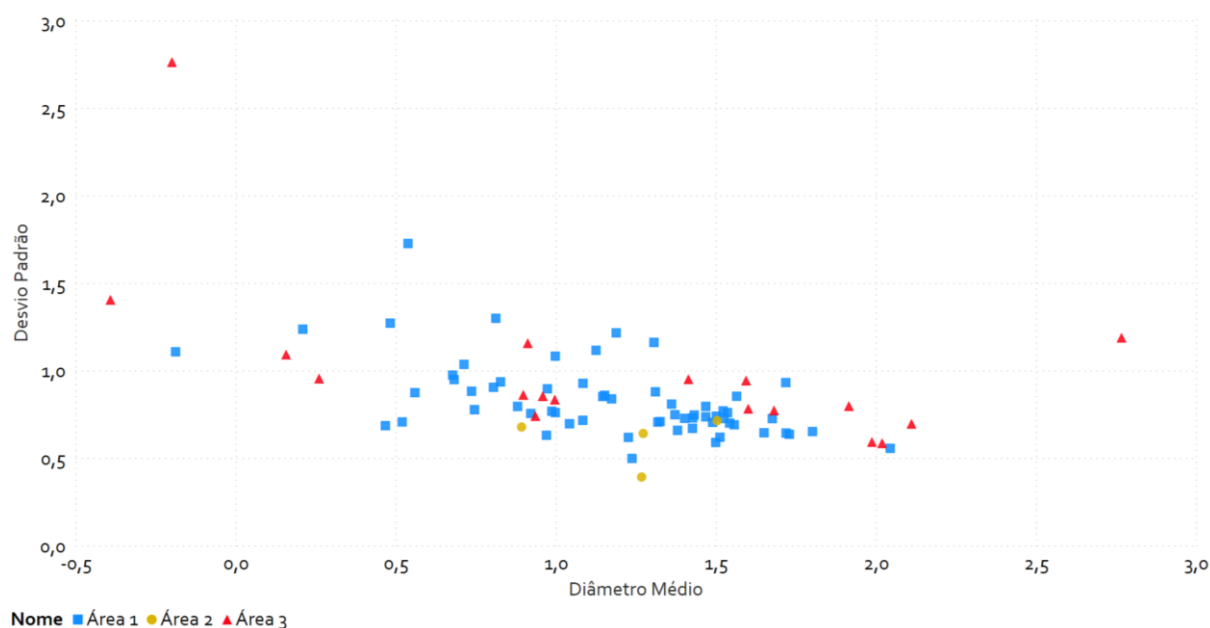


Figura 6.4: Gráfico do desvio padrão pelo diâmetro médio, dados em *phi*.

6.3 SIGNIFICADO DAS ASSEMBLEIAS DE MINERAIS PESADOS IDENTIFICADAS

A assembleia mineralógica de minerais pesados identificada apresenta diversidade moderada. Os resultados mostram que os minerais mais frequentes são a estaurolita, cianita, turmalina e granada enquanto os menos frequentes foram a silimanita, rutilo e anfibólio, e os minerais opacos perfazem 79% do total dos minerais. Esses dados semelham-se com a assembleia minerais do rio Paraná, descrita por Santos & Gasparetto (2008).

A assembleia de minerais pesados quando comparada com a associação estabelecida por Pereira *et al.* (2005), indica que os sedimentos passaram ao menos por dois ciclos sedimentares. Esses minerais foram formados em rochas metamórficas, devido à presença de estaurolita, cianita, silimanita,

e granada, como em rochas ígneas, pela ocorrência de piroxênio (augita-aegirina augita), hornblenda verde e rutilo, e pelo retrabalhamento dos sedimentos pois foram observadas impregnações de óxidos de ferro e a presença de rutilo, turmalina e alguns grãos de zircões arredondados.

Esses sedimentos podem ter sido formados por rochas cristalinas do maciço central brasileiro, de composição metamórfica de grau médio com rochas ígneas ácidas e pegmatitos e por retrabalhamento de rochas preexistentes (Santos & Gasparetto 2008). O retrabalhamento possivelmente está relacionado aos processos erosivos das formações Botucatu e Piramboia (Fernandes 1992, Gasparetto & Santos 2005) ou das formações Furnas, Botucatu e Grupo Itararé (Coimbra 1976, e Suguio 1973) para formar o grupo Bauru. Posteriormente, esse grupo passou por processos erosivos e atualmente compõe os depósitos aluviais do rio Paraná, juntamente com os sedimentos oriundos do basalto da Província Magmática do Paraná, devido à ocorrência do piroxênio augita-aegirina augira e anfibólio hornblenda verde Coimbra (1976).

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

As principais conclusões obtidas nesta monografia são listadas a seguir:

- ❖ A análise dos resultados estatísticos acerca do desvio padrão, assimetria e curtose mostrou uma disparidade entre os métodos de Folk e Ward (1957) e de momentos, principalmente para a assimetria e curtose e por mais que o método dos momentos se apresente mais assertivo, o método de Folk & Ward (1957) é mais compatível com as classes granulométricas e ainda é o mais utilizado.
- ❖ Os sedimentos mostraram-se eficazes para o uso na construção civil, entretanto algumas amostras apresentam algumas limitações sendo algumas mais indicadas para argamassas e outras para concreto.
- ❖ Os sedimentos não apresentaram discrepâncias dos parâmetros (desvio padrão, assimetria, curtose, grau de arredondamento e esfericidade) quanto ao local de deposição no leito do rio, mas apresentam variações entre as três áreas.
- ❖ A assembleia de minerais pesados indica que os sedimentos que compõem os depósitos de areia do rio Paraná provem do grupo Bauru e da Província Magmática do Paraná.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Mineração (ANM). 2021. Arrecadação da CFEM por substância. Disponível em: <https://sistemas.anm.gov.br/arrecadacao/extra/Relatorios/arrecadacao_cfem_substancia.aspx>, acessado em 12/06/2022.
- Alcántara-Carrió, J., Cabrera, L., Alonso, I., Alejo, I., Rey, S., & Gago, L. (2001). Parámetros granulométricos: comparación entre el método gráfico y el método de los momentos. *Geotemas* (Madrid).
- Almeida, F.F.M. & Hasui, Y. 1983. O Pré-Cambriano do Brasil. Edgard Blücher, 378 p. in Milani, E.J. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 2005. NBR 7211: Agregados para concretos - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 2010. NBR ISO 3310-1: NBR ISSO 3310-1: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1, IDT). Especificação. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil (ANEPCA). O Mercado de Agregados no Brasil. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br>>. Acesso em: 06 out. 2016. in Brasil. Agência Nacional de Mineração. 2019. Sumário Mineral / Coordenação Geral Marina Marques Dalla Costa, Karina Andrade Medeiros e Thiers Muniz Lima. Brasília: ANM, 201 p.
- Barros, C. S. 2006. Dinâmica sedimentar e hidrológica na confluência do rio Ivaí com o rio Paraná, município de Icaraíma–Pr. Universidade Estadual de Maringá. DGE.
- Bauer, L. A. F. 1994. Materiais de Construção. 5ª edição. Brasil: Livro Técnico e.
- Besser, M. L., Brumatti, M., & Spisila, A. L. 2021. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Paraná.
- Blott, S. J., & Pye, K. 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248.
- Brasil. Agência Nacional de Mineração. 2019. Sumário Mineral / Coordenação Geral Marina Marques Dalla Costa, Karina Andrade Medeiros e Thiers Muniz Lima. Brasília: ANM, 201 p.
- Caracciolo, L. 2020. Sediment generation and sediment routing systems from a quantitative provenance analysis perspective: Review, application and future development. *Earth-Science Reviews* 209: 103226.
- Coimbra, A. M. 1976. Arenitos da Formação Bauru: estudo de áreas-fonte (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Dias, J. A. A. 2004. Análise Sedimentar e o Conhecimento dos Sistemas Marinhos. Universidade do Lagarve. Faro
- Dos Santos, M. L., & Gasparetto, N. V. L. 2008. Minerais pesados dos depósitos aluviais do rio Paraná e sua implicação Paleohidrológica. *Pesquisas em Geociências*, 35(2), 71-81.
- Fabro, F., Gava, G. P., Grigoli, H. B., & Meneghetti, L. C. 2011. Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. *Revista IBRACON de estruturas e materiais*, 4(2), 191-212.
- Fernandes, L. A. 1992. A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá Dissertação de doutorado, Universidade de São Paulo.
- Fernandes, L. A. Magalhães Ribeiro, C. M. 2015. Evolution and palaeoenvironment of the Bauru Basin (Upper Cretaceous, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*. 61. p: 71-90.
- Fernandes, L. A., & Coimbra, A. M. 1996. A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil). *Geociências*, 93, 4524-9.
- Folk, R. L. 1980. Petrology of sedimentary rocks. Hemphill publishing company.
- Folk, R. L., & Ward, W. C. 1957. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of sedimentary research*. 27(1). 3-26.
- Friedman, G. M. 1961. Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics. *Journal of Sedimentary Research*, 31(4), 514-529.

Araújo, M. C. S. 2022, Proveniência Sedimentar, aspectos texturais e granulométricos dos sedimentos...

Gasparetto, N. V. L., & dos Santos, M. L. 2005. O emprego de minerais pesados como indicador da proveniência da cobertura pedológica do Arenito Caiuá na região Noroeste do Paraná. *Pesquisas em Geociências*, 32(1), 63-67.

Haque, M. B., Tuhin, I. A., & Farid, M. S. S. 2012. Effect of aggregate size distribution on concrete compressive strength. *SUST journal of science and technology*, 19(5), 35-39.

Kiambigi, M. G. A. & Koteng, D. O. 2018. Effects of different fine aggregate on concrete strength. *Proceedings of Sustainable Research and Innovation Conference*: p. 135-140.

Mange, M. A., & Maurer, H. 2012. Heavy minerals in colour. Springer Science & Business Media.

Mange, M. A., & Maurer, H. 2012. Heavy minerals in colour. Springer Science & Business Media.

Martins, L. R. 2003. Recent sediments and grain-size analysis. *Gravel*. 1. 90-105p.

Miall, A. D. 1981. Analysis of Fluvial Depositional Systems. American Association of Petroleum Geologists. Calgary

Milani, E. J. 2004. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: de Almeida, F. F. M. *Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca. p: 266-279

Milani, E. J., & Ramos, V. A. 1998. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*. 28(4). 473-484 p.

Milani, E.J. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental.

Milani, J.E. França, A. B. Medeiros, R. A. 2007b. Rochas Geradoras e Rochas-Reservatório da Bacia do Paraná, Faixa Oriental de Afloramentos, Estados do Paraná. *Boletim de Geociências - Petrobras*. 15(1). p: 135-162

Milani, J.E. Melo, J.H.G de. Souza, P.A. de. Fernandes, L. A. França, A. B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências - Petrobras*. 15(2). p:265-287

Morton, A. C., & Hallsworth, C. 1994. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 90(3-4): 241-256.

Pereira, R. M., dos Santos Lima, P. R. A., & Ávila, C. A. 2005. Minerais em grãos: técnicas de coleta, preparação e identificação. *Oficina de Textos*.

Pettijohn, F.J.; Potter, P.E. & Siecer, R. 1973. Sand and sandstone. In: Quinamo, L. D. A. 2017. Estudo dos minerais pesados ao longo do sistema estuarino Goiana/Megaó-PE: distribuição e proveniência. *Doctoral dissertation, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco*, 130 p

Ponçano, W. L. 1985. Sedimentação atual aplicada a portos no Brasil (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Pupin, J. P. 1980. Zircon and granite petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73(3), p: 207-220.

Quinamo, L. D. A. 2017. Estudo dos minerais pesados ao longo do sistema estuarino Goiana/Megaó-PE: distribuição e proveniência. *Doctoral dissertation, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco*, 130 p

Remus, M. V. D., Souza, R. S., Cupertino, J. A., De Ros, L. F., Dani, N., & Vignol-Lelarge, M. L. 2008. Proveniência sedimentar: métodos e técnicas analíticas aplicadas. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(2): 166-185.

Ribeiro, S. & Bonetti, C. 2013. Variabilidade morfométrica de sedimentos arenosos: revisão de métodos e uso do software ImageJ na diferenciação de ambientes deposicionais na Ilha de Santa Catarina e região continental, SC, Brasil. *Gravel*, 11(1), 37-47p.

Rocha, P.C. 2010. Variação Espaço-Temporal dos Sedimentos do Leito em Canais da Planície Fluvial do Alto Rio Paraná, Centro-Sul do Brasil. *VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia*.

Sabih, G., Tarefder, R. A., & Jamil, S. M. 2016. Optimization of gradation and fineness modulus of naturally fine sands for improved performance as fine aggregate in concrete. *Procedia Engineering*, 145, 66-73.

Sallun, A. E. M., Suguio, K., & Azevedo, J. M. A. S. M. 2008. Sedimentologia da Aloformação Paranaíba, Bacia Hidrográfica do Alto Rio Paraná (SP, PR e MS). *Pesquisas em Geociências*, 35(1), 85-107.

- Sallun, A. E. M., Suguio, K., & Stevaux, J. C. 2007. Proposição formal do alogrupo alto Rio Paraná (SP, PR e MS). *Geologia USP. Série Científica*, 7(2), 49-70.
- Santos, D. N. D. 2013. Análise da extração de areia no trecho livre do canal do alto curso do rio Paraná, entre os municípios de Guaíra e Marilena (PR): impactos ambientais e aplicabilidade. Doctoral dissertation, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 188 p
- Shepard F.P. 1967. *Submarine Geology*. 2. ed. New York: Harper & Row, 567 p.
- Stevaux, J. C. 1993. O rio Paraná: geomorfogênese, sedimentação e evolução quaternária do seu curso superior (região de Porto Rico, PR). Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo, São Paulo, 261 p
- Suguio, K. 1973. Introdução à sedimentologia. No. 552.5 SUG
- Suguio, K. 2017. *Geologia do Quaternário e mudanças ambientais*. Oficina de textos.
- Swan, D., Clague, J., & Leternauer, J. 1979. Grain-size statistics II: Evaluation of grouped moment measures: *Jour. Sed.*
- Tristão, F. 2005. Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento. Doctoral dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 167 p
- Universidade Estadual de Maringá (UEM). 2022. Programa de Pós-Graduação em Geografia Mestrado e Doutorado - PGE Disponível em: <<http://www.pge.uem.br/>>, acessado em 05/06/2022.
- Vandhiyan, R., Vijay, T. J., & Kumar, M. 2021. Effect of fine aggregate properties on cement mortar strength. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2019-2026.
- Wentworth, C. K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*. 30(5). 377-392p.
- Zalán, P. V. Wolff, S. Conceição, J. C. J. Marques, A. Astolfi, M. A. M. Vieira, I. S. Appi, V. T. Zonatto, O. A. 1990. Sinécleses Intracratônicas - Bacia do Paraná. In: Babaglia, G. P. R. Milani, E. J. *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. Rio de Janeiro. Petrobras